

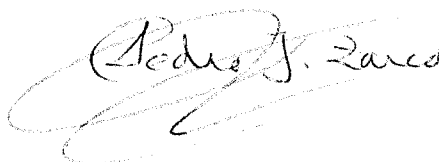
UNIVERSIDAD DE SEVILLA
DEPARTAMENTO DE INGENERÍA ELÉCTRICA

**ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS
DE REDES ELÉCTRICAS UTILIZANDO
HISTÓRICOS DE MEDIDAS**

TESIS DOCTORAL

Autor: D. Pedro Javier Zarco Perriñán

Director: D. Antonio Gómez Expósito



248

8

17 MAR. 1997



A mi esposa e hijos, por el tiempo que no les he dedicado.

A mis padres y hermana, por haberme incitado a realizar esta bella obra.

A todos los que me han animado en los momentos de desesperación.

“La perseverancia toda cosa alcanza.”

Refranero español

Agradecimientos

Aunque a veces las palabras no saben expresar todo lo que una persona siente, quisiera manifestar mi más sincero agradecimiento a D. Antonio Gómez Expósito, por su ayuda en la dirección y realización de esta Tesis.

Asimismo, y también de una forma muy especial, a D. José Luis Martínez Ramos, que me ha prestado su inestimable ayuda en todo lo que he necesitado desde que comencé esta obra.

Desearía tener un recuerdo muy entrañable para D. Juan Manuel Ruiz Muñoz, por lo que me ayudó en los albores de este trabajo.

También desearía expresar mi agradecimiento a todas las personas del Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Escuela Superior de Ingenieros, así como a D. Javier Alonso Rodríguez, D. Guillermo Guillén Machuca, D. Ramón Abella Monserrat y D. Antonio Luque Pérez, de Sevillana de Electricidad, por el constante interés que han mostrado durante su elaboración.

Por último, y de una forma muy especial, a toda mi familia, por el apoyo y la ayuda que han supuesto para mí.

Sevilla, 1997.

El autor.

Índice general

1	Resumen y Objetivos de la Tesis	1
2	La Estimación de Estado en Redes Eléctricas	5
2.1	Introducción	5
2.2	Hipótesis y datos de entrada	6
2.3	Formulación matemática. Mínimos cuadrados ponderados	17
2.4	Resultados de la estimación de estado	22
2.5	Aspectos relacionados	28
2.5.1	Observabilidad	28
2.5.2	Detección de errores no gaussianos	33
2.6	Resumen	37
3	Estimación de Parámetros en Redes Eléctricas	39
3.1	Introducción	39
3.2	Identificación de errores en los parámetros	40
3.3	Clasificación de los métodos de estimación de parámetros	41
3.4	Métodos que no amplían el vector de estado.	43
3.5	Métodos que amplían el vector de estado	50
3.5.1	Resolución mediante ecuaciones normales	51
3.5.2	Resolución mediante filtro de Kalman	52
3.6	Discusión	56
3.7	Identificación de errores topológicos	60
3.8	Resumen	71
4	Influencia de Errores en los Parámetros sobre la Estimación	73
4.1	Introducción	73
4.2	Entorno de simulación	74
4.3	Carácter local del efecto de los errores en los parámetros	77

4.4	Análisis del nivel de error en las medidas	80
4.5	Errores en la conductancia y en la susceptancia	84
4.6	Influencia de los flujos e inyecciones sobre las medidas estimadas	86
4.7	Influencia sobre las medidas estimadas	87
4.8	Resumen	89
5	Estimación de Parámetros de Redes mediante Datos Histó- ricos	93
5.1	Introducción	93
5.2	Estimación “on-line” frente a estimación “off-line”	94
5.3	Inclusión de la información previa existente sobre el parámetro .	95
5.4	Método propuesto basado en datos históricos	98
5.5	Carácter local de la estimación de parámetros	102
5.6	Resumen	107
6	Resultados Experimentales	109
6.1	Introducción	109
6.2	Estimación de impedancias o admitancias	110
6.3	Influencia del número de muestras utilizadas	110
6.4	Relación con el nivel de error en las medidas	112
6.5	Influencia del tipo de medidas disponibles	116
6.6	Estimación de varios parámetros simultáneamente	119
6.7	Optimalidad de los parámetros estimados	121
6.8	Resultados del estimador con los parámetros mejorados	122
6.9	Coste computacional del método propuesto	123
6.10	Aplicación a la identificación de errores topológicos	124
6.11	Resumen	128
7	Conclusiones y Líneas Futuras de Investigación	131
7.1	Resumen y conclusiones	131
7.2	Sugerencias para futuras líneas de investigación	134
A	Solución Numérica de la Estimación de Estado	137
A.1	Introducción	137
A.2	Ecuaciones normales con restricciones	137
A.3	Transformaciones ortogonales	139
A.4	Método híbrido	140
A.5	Método de la matriz aumentada de Hachtel	140
A.6	Método de pseudoinversas	141

A.7 Método de la matriz aumentada por bloques	143
B Propiedades Estadísticas de la Estimación de Mínimos Cuadrados	145
B.1 Introducción	145
B.2 Propiedades estadísticas	145
C Elementos de la Matriz Jacobiano	149
C.1 Introducción	149
C.2 Elementos de la matriz	149
D Fondos de Escala Utilizados en el Entorno de Simulación	153
D.1 Introducción	153
D.2 Fondos de escala de la red IEEE-14	153
D.3 Fondos de escala de la red IEEE-118	156

Índice de figuras

2.1	Error general de clase.	8
2.2	Error de linealidad.	9
2.3	Error de reproducibilidad.	9
2.4	Errores límites de relación para transformadores de intensidad de clase 0.5.	11
2.5	Errores límites de fase para transformadores de intensidad de clase 0.5.	12
2.6	Errores límites para transformadores de intensidad de clase 0.5.	12
3.1	Modelo del transformador utilizado.	46
3.2	Modelo del transformador considerado.	50
4.1	Red IEEE-14.	75
4.2	Influencia del error conjunto en la susceptancia y la conductancia de una línea sobre las medidas: (a): De toda la red (trazo discontinuo); (b): Adyacentes (trazo continuo).	78
4.3	Influencia del error de una línea sobre las medidas estimadas a distintas <i>distancias</i> : Error de las medidas estimadas con error en una línea / Error de las medidas estimadas sin error en la línea.	79
4.4	Influencia del error conjunto en la susceptancia y la conductancia de una línea sobre las medidas adyacentes para distintas clases.	81
4.5	Influencia del error de una línea frente a la relación entre los errores de las medidas estimadas y las telemedidas.	82
4.6	Influencia del error de una línea sobre las medidas estimadas a <i>distancia 1</i> para distintas clases: Error de las medidas estimadas con error en una línea / Error de las medidas estimadas sin error en la línea.	83

4.7	Influencia del error de una línea sobre las medidas estimadas a <i>distancia 2</i> para distintas clases: Error de las medidas estimadas con error en una línea / Error de las medidas estimadas sin error en la línea.	83
4.8	Influencia del error en la susceptancia y en la conductancia de una línea sobre las medidas adyacentes.	85
4.9	Influencia del error en la susceptancia de una línea sobre las medidas adyacentes con diferentes tipos de medidas.	87
4.10	Influencia sobre las medidas de tensión adyacentes cuando todas las medidas son exactas excepto las de tensión.	88
4.11	Influencia sobre las medidas de inyección adyacentes cuando todas las medidas son exactas excepto las de inyección.	89
4.12	Influencia sobre las medidas de flujo adyacentes cuando todas las medidas son exactas excepto las de flujo.	90
5.1	Error en la susceptancia estimada de la línea que une los nudos 7 y 9 en la red IEEE-14 frente al peso relativo del parámetro.	96
5.2	Error en la susceptancia estimada de la línea que une los nudos 10 y 11 en la red IEEE-14 frente al peso relativo del parámetro.	97
5.3	Red IEEE-118.	104
5.4	Resultado del análisis de sensibilidad de la línea que une los nudos 49 y 51 en la red IEEE-118.	106
6.1	Relación entre el error de las medidas y el error del parámetro estimado frente al Número de estados procesados simultáneamente.	111
6.2	Influencia del error en la susceptancia de una línea sobre las medidas adyacentes, con distintas clases, cuando se procesa un estado.	113
6.3	Influencia del error en la susceptancia de una línea sobre las medidas adyacentes, con distintas clases, cuando se procesan siete estados simultáneamente.	113
6.4	Influencia del error en la susceptancia de una línea sobre las medidas adyacentes, con distintas clases, cuando: (a): No se realiza estimación de parámetros; (b): Se estima procesándose siete estados simultáneamente.	114
6.5	Media del error de las medidas / Error del parámetro estimado frente al Número de estados procesados simultáneamente con diferente redundancia.	118

6.6	Influencia del error en la susceptancia de cinco líneas sobre las medidas de toda la red, con distintas clases.	120
6.7	Influencia del error en las susceptancias de cinco líneas sobre las medidas de toda la red, con distintas clases, cuando se procesan siete estados simultáneamente.	121

Índice de tablas

2.1	Errores máximos admitidos en la norma CEI para transformadores de intensidad.	10
2.2	Límites del error de relación y del desfase para transformadores de tensión.	13
6.1	Influencia del error de la susceptancia de una línea sobre las medidas cuando se estima el parámetro.	112
6.2	Errores de las medidas adyacentes utilizadas sin estimar parámetro y estimándolo.	115
6.3	Errores de los parámetros estimados para diferentes niveles de errores en las medidas y redundancia completa. (a): Error medio de las telemidas (%); (b): Error del parámetro estimado (%).	116
6.4	Influencia del error de la susceptancia de una línea cuando sólo se dispone de medidas de tensiones e inyecciones y se estima dicho parámetro.	117
6.5	Influencia del error de la susceptancia de una línea cuando sólo se dispone de medidas de tensiones y flujos y se estima dicho parámetro.	117
6.6	Valores estimados del parámetro para distintos valores de partida de éste.	122
6.7	Valor estimado del parámetro cuando se parte de un valor estimado previamente.	123
6.8	Análisis topológico cuando se tiene información de que la línea se encuentra cerrada y realmente se encuentra cerrada.	125
6.9	Análisis topológico cuando se tiene información de que la línea se encuentra abierta y realmente se encuentra abierta.	126
6.10	Análisis topológico cuando se tiene información de que la línea se encuentra cerrada y realmente se encuentra abierta.	127

6.11	Análisis topológico cuando se tiene información de que la línea se encuentra abierta y realmente se encuentra cerrada.	128
D.1	Fondos de escala considerados para los nudos de la red IEEE-14 en por unidad y sobre una base de 100 MVA.	154
D.2	Fondos de escala considerados para las ramas de la red IEEE-14 en por unidad y sobre una base de 100 MVA.	155
D.3	Fondos de escala considerados para los nudos de la red IEEE-118 en por unidad y sobre una base de 100 MVA.	157
D.4	Fondos de escala considerados para los nudos de la red IEEE-118 en por unidad y sobre una base de 100 MVA (continuación). . .	158
D.5	Fondos de escala considerados para los nudos de la red IEEE-118 en por unidad y sobre una base de 100 MVA (continuación). . .	159
D.6	Fondos de escala considerados para los nudos de la red IEEE-118 en por unidad y sobre una base de 100 MVA (continuación). . .	160
D.7	Fondos de escala considerados para las ramas de la red IEEE-118 en por unidad y sobre una base de 100 MVA.	161
D.8	Fondos de escala considerados para las ramas de la red IEEE-118 en por unidad y sobre una base de 100 MVA (continuación). .	162
D.9	Fondos de escala considerados para las ramas de la red IEEE-118 en por unidad y sobre una base de 100 MVA (continuación). .	163
D.10	Fondos de escala considerados para las ramas de la red IEEE-118 en por unidad y sobre una base de 100 MVA (continuación). .	164
D.11	Fondos de escala considerados para las ramas de la red IEEE-118 en por unidad y sobre una base de 100 MVA (continuación). .	165
D.12	Fondos de escala considerados para las ramas de la red IEEE-118 en por unidad y sobre una base de 100 MVA (continuación). .	166
D.13	Fondos de escala considerados para las ramas de la red IEEE-118 en por unidad y sobre una base de 100 MVA (continuación). .	167
D.14	Fondos de escala considerados para las ramas de la red IEEE-118 en por unidad y sobre una base de 100 MVA (continuación). .	168
D.15	Fondos de escala considerados para las ramas de la red IEEE-118 en por unidad y sobre una base de 100 MVA (continuación). .	169

Lista de símbolos

Letras minúsculas

e_p	Error del parámetro de red	41
\hat{e}_p	Error del parámetro estimado	43
h	Ecuaciones del modelo del sistema	17
m	Número de medidas	17
n	$2N - 1$	34
p	Vector de parámetros de red exactos	40
\hat{p}	Vector de parámetros de red estimados	53
p_0	Información a priori del vector de parámetros	52
r	Residuo de las medidas	35
r_N	Residuo normalizado de las medidas	35
r_x	Residuo de las variables de estado	35
x	Vector de variables de estado	17
\hat{x}	Vector de variables de estado estimadas	18
x^k	Vector de estado en la iteración k-ésima	19
z	Vector de telemidas	17
\hat{z}	Vector de telemidas estimadas	35

Letras mayúsculas

D	Matriz diagonal	36
FE	Fondo de escala del aparato de medida	15
G	Matriz de ganancia	20
H	Matriz jacobiano	19
I	Matriz unitaria	36
$J(x)$	Función objetivo	18
N	Número de nudos de la red	28
P_x	Matriz de covarianzas de la estimación	35
P_z	Matriz de covarianzas residual	35
R	Matriz de covarianzas de las medidas	13
S_r	Matriz de sensibilidad residual	43
T	Matriz triangular superior cuya diagonal es cero	36
U	Matriz triangular superior	20
V	Vector de tensiones de los nudos	28
VM	Valor medido	15
W	R^{-1}	17

Letras griegas

σ	Desviación típica de las medidas	14
ν	Vector de errores de las medidas	17
θ	Vector de fases de las tensiones de los nudos	28

Operaciones no definidas en la Tesis

H^T	Matriz traspuesta
L^{-1}	Matriz inversa

Capítulo 1

Resumen y Objetivos de la Tesis

Los estimadores de estado son el corazón de los modernos sistemas de gestión de energía en todo el mundo y el rendimiento de otras aplicaciones, como las de análisis de seguridad, despacho económico, etc., dependen en gran medida de la exactitud de los datos que proporciona el estimador de estado.

Basándose en:

- Las medidas de campo proporcionadas por el sistema de supervisión del control y adquisición de datos (telemidas).
- Aquéllas que no requieren ser medidas, como por ejemplo la inyección cero en las subestaciones de transporte (medidas virtuales).
- El conocimiento previo de ciertos datos con menos precisión que si fuesen medidos (pseudomedidas).
- Los valores de los parámetros de la red (R , L , etc.).
- La información topológica o estructural (posición de interruptores, etc.).
- El modelo matemático del sistema.

el estimador de estado se aprovecha de la redundancia que existe en las medidas (más medidas que las necesarias para determinar la condición de la red) con objeto de evitar el ruido que inevitablemente lleva asociado el proceso de medición.

Los errores en los estados de los interruptores, y que por tanto afectan a la topología de la red, producen normalmente grandes inconsistencias en las medidas estimadas y pueden ser fácilmente identificables. Sin embargo, los errores en las impedancias de las ramas son menos visibles y pueden producir errores continuos en los datos proporcionados por el estimador durante grandes periodos de tiempo sin que éstos se detecten.

Estos errores en los parámetros, tales como:

- Incorrectas impedancias de ramas.
- Modelado incorrecto de los transformadores o posicionamiento incorrecto del intercambiador de tomas.

pueden ser debidos a:

- Datos erróneos facilitados por el fabricante.
- Errores en la calibración.
- Discrepancias entre la longitud real de las líneas y la de diseño.
- Cambio de las tomas de transformadores por parte de personal de campo sin que se lo haya comunicado al Centro de Control, etc.

y pueden producir:

- Una degradación significativa de la exactitud de los resultados del estimador de estado y, como consecuencia, de los resultados de los programas cuyos datos de entrada son los de salida del estimador.
- Una detección de medidas erróneas que realmente no lo son, debido a su inconsistencia con los parámetros erróneos.
- Una reducción de la confianza del operador en el estimador de estado.

Desde el punto de vista del estimador de estado, un error en un parámetro tiene el mismo efecto que un conjunto de errores correlacionados que actuaran sobre todas las medidas que afectan a la rama errónea, es decir, las medidas de flujo sobre la rama y las de inyecciones en los nudos extremos de ella.

Por todo ello, el objetivo de la presente Tesis es:

- Analizar, mediante ensayos estadísticos, los efectos que los errores en los parámetros producen sobre los resultados del estimador de estado, justificándose la necesidad del estimador de parámetros como herramienta que elimine dichos errores. Para realizar dicho análisis se utilizarán diferentes errores de medida y niveles de redundancia.
- Mostrar cómo se pueden organizar los cálculos de manera que, utilizando simultáneamente varios estados diferentes, se puedan estimar uno o varios parámetros con un sobrecosto moderado comparado con el que produciría el procesamiento secuencial de dichos estados.

Algunos resultados parciales recogidos en la presente Tesis pueden encontrarse asimismo en [103, 104].

La Tesis ha sido estructurada de la siguiente manera:

- El Capítulo 2 constituye un resumen amplio de la estimación de estado desde sus diferentes puntos de vista.
- El Capítulo 3 es un resumen crítico del estado del arte de la identificación y estimación de parámetros, incluyéndose además la identificación de errores topológicos como tema relacionado.
- En el Capítulo 4 se estudia la influencia de los errores en los parámetros sobre la estimación de estado, analizándose los factores que tienen más importancia, lo que permitirá discernir qué es principal y qué es secundario.
- El Capítulo 5 presenta las características de la estimación *off-line* así como el método de estimación de parámetros propuesto, basado en datos históricos de medidas. Además, se realiza una justificación del carácter local de la estimación de parámetros.
- El Capítulo 6 constituye la justificación experimental del método propuesto, pudiéndose comparar los resultados que se obtienen si no se realiza la estimación de parámetros con los obtenidos utilizando dicho método.
- Por último, el Capítulo 7 recoge las principales conclusiones del trabajo realizado en el ámbito de la presente Tesis, exponiéndose asimismo futuros desarrollos y líneas de investigación.

- A continuación se incluye la Bibliografía utilizada así como los siguientes Apéndices:
 - El Apéndice A realiza una exposición de diversos métodos propuestos para la resolución numérica de la estimación de estado.
 - El Apéndice B muestra las propiedades estadísticas del estimador de mínimos cuadrados ponderados.
 - El Apéndice C presenta los elementos de la matriz jacobiano, incluyendo los que aparecen en la formulación propuesta.
 - El Apéndice D muestra los fondos de escala utilizados para las medidas del entorno de simulación utilizado.

Capítulo 2

La Estimación de Estado en Redes Eléctricas

2.1 Introducción

Cuando en 1965 se produjo el incidente que dejó sin alimentación de energía eléctrica al nordeste de los Estados Unidos, las empresas eléctricas tomaron conciencia de que debían realizar un gran esfuerzo para desarrollar nuevas técnicas en la operación de los sistemas de potencia que permitieran un elevado nivel de seguridad en el servicio. Esto dio lugar a que los antiguos métodos y herramientas de operación resultaran inadecuados.

Se comenzó a hablar de análisis de seguridad, índices de seguridad, mejora de la seguridad, análisis de estabilidad, optimización y se empezaron a construir nuevos centros de control. Hasta entonces, el control y la decisión de la operación se basaban en un sistema de supervisión, que controlaba las posiciones de los interruptores en las subestaciones, y un sistema separado, generalmente análogo al anterior, que controlaba de manera automática la generación y el despacho económico. Por lo tanto, los únicos datos que el operador tenía disponibles en tiempo real eran el estado de los interruptores, la frecuencia del sistema y el conjunto de medidas de potencia necesarias para el control de la generación.

Partiendo de esta situación el esfuerzo se centró en conseguir cada pocos segundos la información, tanto de los interruptores como de todas las medidas de la red que se controlaba. Teniendo todos estos valores en tiempo real en la base de datos era posible comprobar la seguridad continuamente, es decir, se podían analizar las condiciones de operación de cada equipo de la red y

detectar las situaciones anormales y alarmantes de funcionamiento. Este proceso de captación, detección y señalización del sistema, junto con la utilización de pantallas gráficas y el almacenamiento de todos los eventos, constituyó el sistema de supervisión del control y adquisición de datos (SCADA en inglés).

Con todo lo anterior, se pensó que teniendo la base de datos actualizada periódicamente, gracias al SCADA, se podría llevar el seguimiento y el control de la seguridad del sistema con sólo introducir las medidas en los programas de control. Pero no era correcto y fue Schweppe el que reconoció desde el principio que había dos problemas fundamentales para la ejecución de las funciones de seguridad.

En primer lugar, aunque el número de medidas era generalmente muy grande siempre había inconsistencias, ya que ciertas medidas desaparecían temporalmente o había medidas con errores no gaussianos. En segundo lugar, las nuevas funciones de seguridad necesitaban un punto de partida, es decir, un reparto de cargas en tiempo real. Como consecuencia de lo primero, los programas de reparto de cargas que se venían utilizando hasta esas fechas no se podían utilizar en tiempo real, por lo que no había forma práctica de realizar funciones de seguridad.

Schweppe, con la estimación de estado, resolvió tanto el problema de los datos como el de la resolución en tiempo real. Como él dijo, “el estimador de estado es un purificador de datos”, utilizando una analogía con la purificación de la sangre en el cuerpo humano [34]. Pero es algo más, el estimador de estado es un reparto de cargas en tiempo real. Con esto se aseguraba la ejecución de las funciones de seguridad en los centros de control y el SCADA era reemplazado por lo que hoy día se conoce como sistema de gestión de energía (EMS en inglés).

2.2 Hipótesis y datos de entrada

Schweppe definió la estimación de estado como “un algoritmo de procesamiento de datos que convierte las medidas redundantes y otra información disponible en un estimado del estado del sistema eléctrico” [102]. Hoy en día, la estimación de estado es una parte esencial en los sistemas de gestión de energía de todo el mundo.

Las fuentes de información necesarias para el estimador de estado son [39]:

- Los valores de los parámetros de diseño (R , L , etc.).
- La información topológica o estructural (posición de interruptores, etc.).

- El modelo matemático del sistema.
- Los distintos tipos de medida:
 - Telemedidas: Son las que se obtienen en tiempo real desde las remotas de las subestaciones a través del SCADA. Los datos típicos que se incluyen son:
 - * Las tensiones e inyecciones de activa y reactiva en los nudos.
 - * Los flujos de potencia activa y reactiva en las líneas.
 - Pseudomedidas: Son valores obtenidos basándose en los datos históricos existentes, por lo que tienen menos precisión que si fuesen medidos; por ejemplo, la potencia generada en las centrales o la demanda de las subestaciones.
 - Medidas virtuales: Son aquellas que no requieren ser medidas, como por ejemplo la inyección cero en las subestaciones de transporte (*nudos de tránsito*).

Pero ocurre que los datos telemedidos contienen errores debido a la inexactitud de la calibración de los transductores, el efecto de la conversión analógica-digital, el ruido en los canales de comunicación, el desequilibrio entre fases, etc., y como se ha comentado previamente, la estimación de estado es un proceso que limpia los datos erróneos ya que las medidas (flujos, tensiones, etc.) están relacionadas entre sí mediante las leyes que gobiernan los circuitos eléctricos. Si hay redundancia en el conjunto de medidas (más medidas que las necesarias para determinar la condición de la red), se puede utilizar un proceso sistemático que corrija los errores.

La exactitud de las medidas no sólo dependerá del transformador de medida, sino también de los transductores y convertidores y se tendrá en cuenta como error de las medidas un único valor que sea conjunción de la suma acumulativa de los errores en los dispositivos que intervienen en todo el proceso. Los parámetros que definen la exactitud de la medida son:

- **Clase:** Se entiende por clase el error máximo que dicho aparato de medida puede tener, tomado en tanto por ciento, con respecto al valor de fondo de escala o señal nominal de salida, en unas condiciones definidas por normas nacionales o internacionales. En la Figura 2.1 se representan los valores verdaderos con trazo continuo y los valores medidos con curva discontinua.

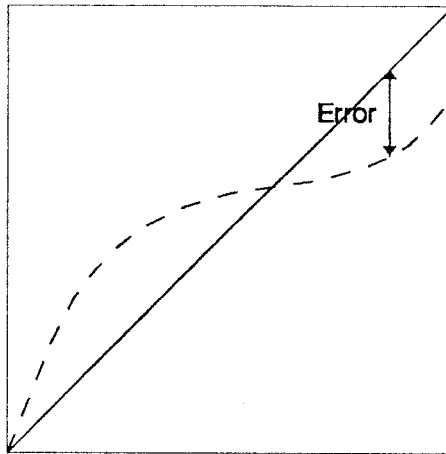


Figura 2.1: Error general de clase.

- **Linealidad:** Se entiende como error de linealidad el error relativo en tanto por ciento, con respecto al valor de fondo de escala, que existe entre el verdadero valor y el valor obtenido con el aparato de medida calibrado perfectamente para la señal de fondo de escala, es decir, ajustado de manera que a la entrada nominal le correspondiese exactamente la salida nominal. En la Figura 2.2 se representan los valores verdaderos con trazo continuo y los valores medidos con curva discontinua.
- **Reproducibilidad o histéresis:** Se entiende por error de reproducibilidad o bien de histéresis, el error que puede darse por diferencia de los valores obtenibles en un convertidor de medida a igualdad de condiciones ambientales, de temperatura, etc., pero repitiendo las medidas en condiciones dinámicas diferentes, es decir, aumentando la medida en un momento y disminuyéndola en otro momento (Figura 2.3).
- **Deriva térmica:** Es el error que puede producirse por variación de la temperatura en el medio ambiente en que se encuentra el instrumento de medida, con respecto a la medida que tiene a una temperatura de referencia. Esta diferencia de valor que se toma también en tanto por ciento con respecto al fondo de escala, puede ser de cero, es decir, de la salida que da el aparato de medida para una entrada que por su ajuste

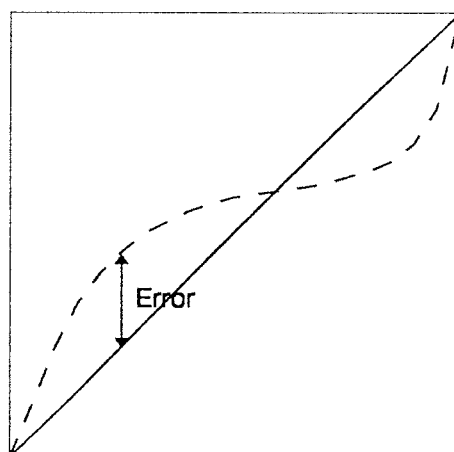


Figura 2.2: Error de linealidad.

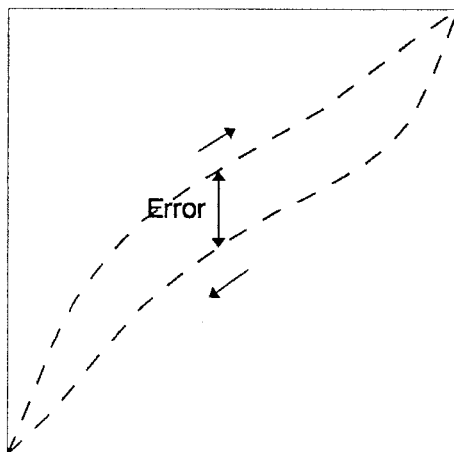


Figura 2.3: Error de reproducibilidad.

Clase de precisión	Error de relación en % para los valores de intensidad expresados en % de la intensidad nominal $\pm \epsilon_1 \%$					Errores de fase para los valores de la intensidad expresados en % de la intensidad nominal $\pm \delta_1$ (minutos)			
	10	20	50	100	120	10	20	100	120
0.1	0.25	0.2	-	0.1	0.1	10	8	5	5
0.2	0.5	0.35	-	0.2	0.2	20	15	10	10
0.5	1.0	0.75	-	0.5	0.5	60	45	30	30
1	2.0	1.5	-	1.0	1.0	120	90	60	60
3	-	-	3	-	3	-	-	-	-
5	-	-	5	-	5	-	-	-	-

Tabla 2.1: Errores máximos admitidos en la norma CEI para transformadores de intensidad.

debiera dar salida igual a cero, o bien puede ser de plena escala, es decir, de la salida que da el aparato de medida para la entrada nominal. Este error se suele dar en tanto por ciento por cada grado centígrado o bien en tanto por ciento por cada diez grados centígrados.

- **Otras magnitudes:** Otras magnitudes, tales como la frecuencia de red, tensión de alimentación, impedancia de carga, pudieran tener algún pequeño efecto sobre el aparato de medida y sobre su precisión, por lo que en algunos de ellos se suele expresar la influencia de dichas magnitudes.

Es necesario tener en cuenta que los tantos por ciento de error que se suelen dar por variación de magnitudes corresponden a unos determinados márgenes de operación y no suelen ser extrapolables a otros valores operacionales.

Siendo la clase el parámetro que más influye en la exactitud de la medida será éste el único que se tendrá en cuenta. Las clases de precisión nominales de los transformadores de intensidad son 0.1, 0.2, 0.5, 1, 3 y 5. En los transformadores de estas clases, los errores de intensidad y fase, a la frecuencia nominal, no deberán sobrepasar los valores de la Tabla 2.1 cuando la carga secundaria esté comprendida entre el 25 y el 100 % de la carga de precisión.

A partir de los valores de la Tabla 2.1 y para cada clase de precisión, puede trazarse una gráfica de líneas quebradas de errores límites tanto de relación

(Figura 2.4) como de fase (Figura 2.5) con los límites de error admisibles. Ambas figuras son las correspondientes a la clase 0.5. Las curvas de errores reales de un transformador deberán quedar comprendidas entre las dos líneas quebradas de dichas figuras.

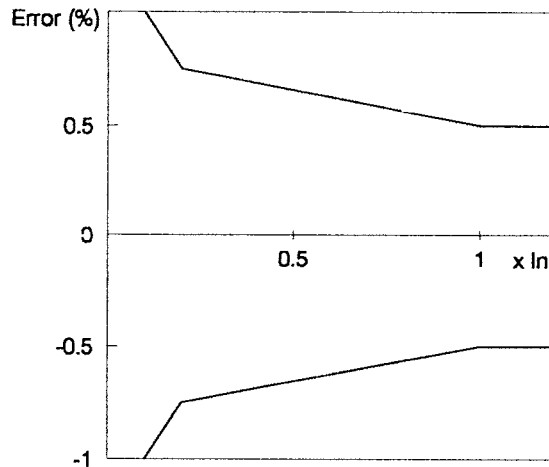


Figura 2.4: Errores límites de relación para transformadores de intensidad de clase 0.5.

Las Figuras 2.4 y 2.5 se pueden unificar en una sola (Figura 2.6) en la que los errores admisibles para clase 0.5 son los comprendidos entre ambos paralelogramos.

Excepto la norma ANSI, todas las normas tienen, fundamentalmente, los mismos valores que la CEI. La principal variante es que las normas UNE y VDE no admiten la clase 5. También hay que tener en cuenta que la norma CEI y la mayor parte de las normas europeas establecen que los errores indicados no deben sobrepasarse para una potencia comprendida entre la nominal y su cuarta parte, con $\cos \varphi = 0.8$, mientras que la norma ANSI solamente exige el cumplimiento de la precisión para una potencia igual a la potencia nominal.

La clase de precisión de un transformador de tensión debe cumplirse en todas las tensiones comprendidas entre el 80 y el 120 % de la tensión nominal y a todas las cargas comprendidas entre el 25 y el 100 % de la precisión, bajo un factor de potencia de 0.8 en retraso. En la Tabla 2.2 se muestran los límites del error de relación y desfase en función de la clase de precisión. Estas exigencias

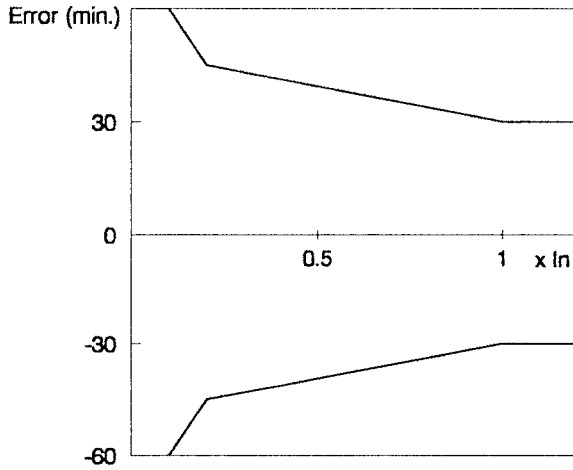


Figura 2.5: Errores límites de fase para transformadores de intensidad de clase 0.5.

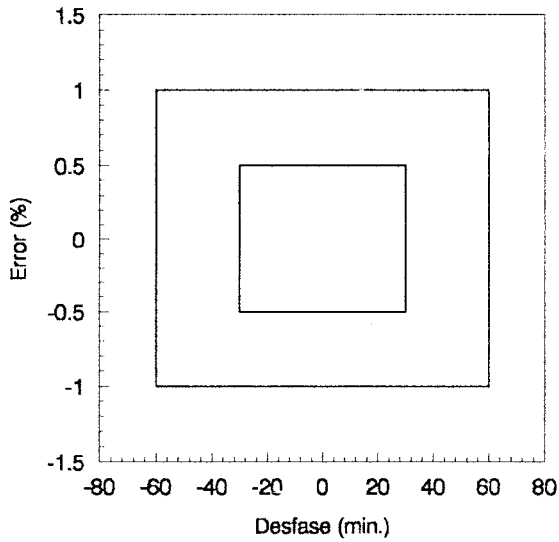


Figura 2.6: Errores límites para transformadores de intensidad de clase 0.5.

Clase	Error de relación (ϵ_u %)	Desfase min. (δ_u)
0.1	± 0.1	± 5
0.2	± 0.2	± 10
0.5	± 0.5	± 20
1	± 1.0	± 40
3	± 3.0	No especificado

Tabla 2.2: Límites del error de relación y del desfase para transformadores de tensión.

de precisión coinciden para todas las normas.

Hasta ahora se han definido las fuentes de información necesarias para el estimador de estado. Éstas son necesarias para poder llevar a cabo la estimación, que se realiza bajo las siguientes hipótesis:

- Las condiciones de operación son equilibradas.
- El sistema trifásico se puede modelar por su circuito equivalente monofásico.
- Las telemidas se captan en el mismo instante de tiempo.
- Los errores de las medidas:
 - Tienen valor medio nulo.
 - Son variables aleatorias independientes: $E(e_i e_j) = 0$, por lo que su matriz de covarianzas R es una matriz diagonal de valor

$$R = E(ee^T) = \begin{bmatrix} \sigma_i^2 & & & \\ & \sigma_i^2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & \sigma_m^2 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

- Tienen distribución gaussiana.
- Se asigna un peso W_{ii} a la medida i basado en su covarianza: $W_{ii} = \sigma_i^{-2}$. Este peso refleja la exactitud esperada de la correspondiente medida.
- Los parámetros de la red son conocidos e invariantes con el tiempo.

- Los estados de todos los interruptores obtenidos a través del SCADA son exactos, por lo que la topología de la red también lo es.

El cálculo de la desviación típica del error de las medida i , σ_i , es propuesto de diferentes maneras según los autores y se pueden diferenciar cuatro grandes grupos:

1. σ es un valor constante:

(a) En [2, 3, 20] se propone:

- Para medidas de inyección: $\sigma = 0.01$ p.u.
- Para medidas de flujo: $\sigma = 0.008$ p.u.
- Para medidas de tensión: $\sigma = 0.004$ p.u.

(b) En [17, 21, 22] se propone:

- Para medidas de potencia: $\sigma = 1$ MW/MVAR.
- Para medidas de tensión: $\sigma = 0.01$ p.u.

(c) En [45] se propone:

- Para medidas de potencia: $\sigma = 0.02$ p.u. (sobre una base de 100 MVA).
- Para medidas de tensión: $\sigma = 0.002$ p.u.

(d) En [46] se propone:

- Para medidas de potencia: $\sigma = 1$ MW/MVAR.
- Para medidas de tensión: $\sigma = 0.005$ p.u.

(e) En [63, 64] se propone:

- Para medidas de potencia: $\sigma = 1.5$ MW/MVAR en 132 KV y $\sigma = 0.8$ MW/MVAR en 33 KV.
- Para medidas de tensión: $\sigma = 0.005$ p.u.
- Para medidas de inyección cero: $\sigma = 0.2$ MW/MVAR.

(f) En [76, 77, 94] se propone:

- Para medidas de potencia: $\sigma = 0.5 \div 1.1$ MW/MVAR en 70 KV y $\sigma = 1.2 \div 5.5$ MW/MVAR en tensiones superiores.
- Para medidas de tensión: $\sigma = 0.005$ p.u.
- Para medidas de inyección cero: $\sigma = 0.3$ MW/MVAR en 70 KV y $\sigma = 0.5$ MW/MVAR en tensiones superiores.

2. σ es función del valor medido:

- (a) En [5, 65] se propone: Para todas las medidas $\sigma = 1\%$ del valor medido.
- (b) En [57] se propone: Para todas las medidas $\sigma \leq 2\%$ del valor medido.
- (c) En [58] se propone: Para todas las medidas $\sigma \leq 3\%$ del valor medido.
- (d) En [52, 62] se propone: Para todas las medidas $\sigma = 2\%$ del valor medido.
- (e) En [79] se propone: Para todas las medidas $\sigma = 0.01\%$ del valor medido.

3. σ es función del fondo de escala:

- (a) En [48] se propone: Para todas las medidas el ruido gaussiano obtenido de un generador de números aleatorios es multiplicado por un porcentaje, sin especificar, del fondo de escala del aparato de medida.
- (b) En [54] se propone:
 - Para medidas de potencia: $\sigma = 0.5\%$ del fondo de escala, siendo éste 1000 MW.
 - Para pseudomedidas: $\sigma = 10 \div 40\%$ del fondo de escala.

4. σ es función del valor medido y del fondo de escala:

- (a) En [8] se propone:

$$\sigma = 0.0067 * VM + 0.00163 * FE \quad (2.2)$$

siendo:

VM el valor medido.

FE el fondo de escala del aparato de medida.

- (b) En [27] se propone:

$$\sigma = 0.015 * VM * \alpha + 0.003 * FE * \alpha \quad (2.3)$$

siendo α un número aleatorio de media cero y desviación típica 1.0 y los valores del fondo de escala:

- Para medidas de potencia:
 - Para generadores: 1.2 p.u. para potencia activa y 0.2 p.u. para reactiva.
 - Para cargas: 0.2 p.u. para potencia activa y 0.1 p.u. para reactiva.
- Para medidas de tensión: 1.5 p.u.

(c) En [30] se propone:

- Para medidas de potencia: $\sigma^2 = (0.006 * VM)^2 + (0.005 * FE)^2$.
- Para medidas de tensión: $\sigma = 0.005 * FE$.

no estando especificado FE .

(d) En [31, 32] se propone: Para las medidas de flujos de potencia

$$\sigma = \alpha * (0.02 * VM + 0.0035 * FE) \quad (2.4)$$

siendo :

$$|\alpha| \leq 1$$

$$FE = 2000 \text{ MVA.}$$

(e) En [36] se propone:

- Para medidas de potencia: $\sigma = \frac{1}{3} (0.005 * FE + 0.02 * VM)$.
- Para medidas de tensión: $\sigma = 0.001 * VM$.

no estando especificado FE .

(f) En [59] se propone:

$$\sigma = 0.012 * VM + 0.0035 * FE \quad (2.5)$$

siendo $FE = 20$ p.u.

(g) En [95] se propone:

$$3 * \sigma = \alpha * VM + \beta * FE \quad (2.6)$$

no estando especificado FE y siendo:

- Para medidas de potencia: $\alpha = 0.02$, $\beta = 0.0052$ y VM y FE son valores en MVA.
- Para medidas de tensión: $\alpha = 0.005$, $\beta = 0.0026$, $VM = 1.0$ p.u., $FE = 1.5$ p.u.

- Para medidas de inyección cero: σ es 20 veces superior al σ típico de medidas de inyección reales.

En los aparatos de medida industriales existe una disparidad similar respecto a la precisión del aparato. Dependiendo del fabricante y del modelo ésta es proporcional a la medida, al fondo de escala o a una suma de ambos factores, pero nunca es constante [61].

2.3 Formulación matemática. Mínimos cuadrados ponderados

El estado de un sistema de potencia hace referencia a su condición de operación y, matemáticamente, todas las cantidades se pueden calcular una vez que se conocen las magnitudes de las tensiones y los desfases de los ángulos. Por lo tanto, el modelo matemático de la estimación de estado se basa en las relaciones matemáticas entre las medidas y las variables de estado.

Sea z el vector de telemidas, x el vector de variables de estado (tensiones en los nudos y fase de los ángulos), h las ecuaciones que relacionan las medidas con las variables de estado y ν el vector de errores de las medidas. Entonces, el vector de medidas se modela como [80, 81]:

$$z = h(x) + \nu \quad (2.7)$$

Se supone (según lo expuesto en el Apartado 2.2) que los errores $\nu_1, \nu_2, \dots, \nu_m$ son variables aleatorias independientes con distribución gaussiana y media cero, siendo m el número de medidas. La varianza σ_i^2 del error de la medida ν_i , proporciona una indicación de la exactitud de la medida. Una varianza elevada indica que la medida no es muy exacta y una varianza pequeña indica que la medida es muy exacta.

Sea R la matriz de covarianzas de errores de las medidas:

$$R = E\{\nu\nu^T\} = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & & & \\ & \sigma_2^2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & \sigma_m^2 \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

y $W = R^{-1}$.

En las ecuaciones (2.7), x es el verdadero valor del estado desconocido y, como los errores ν son variables aleatorias, las medidas z también lo son. Más

aún, z tiene distribución gaussiana con media $h(x)$ y covarianza R . La función de densidad de probabilidad de z se puede escribir [9]:

$$f(z) = (\sqrt{2\pi})^{-m} |W|^{(1/2)} e^{-\frac{1}{2} [z-h(x)]^T W [z-h(x)]} \quad (2.9)$$

En el problema de estimación de estado se reciben un conjunto de telemidas z basándose en el hecho de querer estimar el estado x . El conjunto x que maximiza la función de densidad de probabilidad (2.9) es el estimado de máxima verosimilitud \hat{x} . Esto se basa en el hecho de que si se han observado dichas medidas es porque el estado que dio lugar a ellas es, en sentido estadístico, el más probable, y si no lo es, se habrían observado otras medidas con una probabilidad bastante alta.

Siendo \hat{x} el estimado de máxima verosimilitud, éste posee propiedades deseables para un estimador según la estadística matemática clásica, la cual toma como criterio de bondad para un estimador la varianza del mismo. Es posible afirmar que este estimador posee asintóticamente (siendo m un valor elevado) las siguientes propiedades:

- Insesgado: $E(\hat{x}) = x$.
- Suficiente: Utiliza toda la información estadística existente en la muestra.
- Eficiente: Alcanza la cota de Cramer-Rao [49]

$$- E \left[\frac{\partial \ln f(x, \theta)}{\partial \theta} \left(\frac{\partial \ln f(x, \theta)}{\partial \theta} \right)^T \right] \quad (2.10)$$

- Consistente: $\hat{x}_m \rightarrow x$ si $m \rightarrow \infty$.

Así pues, desde el punto de vista estadístico, es posible afirmar que, como mucho, se encontrará un estimador tan bueno como \hat{x} , pero no mejor.

Maximizar $f(z)$ en (2.9) es equivalente a minimizar el término cuadrático del exponente:

$$J(x) = [z - h(x)]^T W [z - h(x)] \quad (2.11)$$

$$= \sum_{i=1}^m \frac{[z_i - h_i(x)]^2}{\sigma_i^2} \quad (2.12)$$

siendo $J(x)$ la función objetivo de mínimos cuadrados ponderados.

Como en este caso el estimador de máxima verosimilitud minimiza el error cuadrático ponderado con la exactitud de las medidas, éste es el estimado de mínimos cuadrados ponderados (WLS).

La solución del problema WLS (2.11) proporciona el estado estimado \hat{x} que satisface la siguiente condición de optimización:

$$\frac{\partial J(x)}{\partial x} = 0 \Rightarrow g(\hat{x}) = H^T(\hat{x})W[z - h(\hat{x})] = 0 \quad (2.13)$$

donde

$$H(x) = \frac{\partial h(x)}{\partial x} \quad (2.14)$$

es la matriz jacobiano.

Independientemente de la visión estadística de la función $J(x)$ es posible dar otra interpretación geométrica de dicha elección. Por analogía con mínimos cuadrados lineales se puede decir que minimizar dicha función es encontrar el estado que hace que la distancia desde las medidas obtenidas a las medidas estimadas sea mínima.

La solución \hat{x} de la ecuación no lineal (2.13) se puede obtener mediante un método iterativo en el que el vector de estado en la iteración k -ésima es x^k y en cada iteración se resuelve la ecuación lineal:

$$A(x^k)\Delta x^k = -H^T(x^k)W[z - h(x^k)] \quad (2.15)$$

y de la que se obtiene la corrección $\Delta x^k = x^{k+1} - x^k$. En (2.15), $A(x^k)$ es una matriz no singular que depende del método utilizado y mientras que la secuencia de puntos x^k generada por el método iterativo converja, convergerá a la solución de (2.13). La dependencia de x se omitirá en lo sucesivo para simplificar la notación.

Un método que garantiza convergencia cuadrática local es el método iterativo de Newton, para el cual la matriz $A(x)$ viene dada por:

$$A(x) = \frac{\partial g}{\partial x} \quad (2.16)$$

siendo el elemento ij -ésimo de $\partial g/\partial x$:

$$\frac{\partial g_i}{\partial x_j} = \left(\frac{\partial^2 h(x)}{\partial x_i \partial x_j} \right)^T W[z - h(x)] - \left(\frac{\partial h}{\partial x_i} \right)^T W \left(\frac{\partial h}{\partial x_j} \right) \quad (2.17)$$

El método de Newton ignora los términos de derivadas segundas (en [11] se discute lo significativo que pueden llegar a ser estos términos) y queda:

$$A(x) = H^T(x)WH(x) \quad (2.18)$$

por lo que la ecuación (2.15) se transforma en:

$$G(x)\Delta x = H^T(x)W[z - h(x)] \quad (2.19)$$

donde

$$G(x) = H^T(x)WH(x) \quad (2.20)$$

es la matriz de ganancia. Ésta es dispersa, definida positiva y simétrica, lo que asegura la observabilidad del sistema. Las ecuaciones (2.19) son las ecuaciones normales del problema de mínimos cuadrados ponderados que se resuelven mediante la factorización triangular de la matriz de ganancia

$$G = U^T U \quad (2.21)$$

siendo U una matriz triangular superior. Seguidamente se resuelve Δx mediante eliminación hacia adelante y sustitución hacia atrás de

$$(U^T U)\Delta x = H^T W \Delta z \quad (2.22)$$

siendo $\Delta z = z - h(x)$.

La ejecución satisfactoria de la estimación de estado en los modernos sistemas de gestión de energía durante los últimos años ha incitado a la realización de estimadores que abarcan redes cada vez más grandes. Esto implica que cada vez sean mayores los porcentajes de la red externa que se representan.

Con este crecimiento de los sistemas aparecen una serie de problemas que cuando se trata de otros más pequeños no existen. Uno de los principales problemas que se crea es el mal condicionamiento numérico. Cuando el sistema se encuentra mal condicionado aparecen problemas de lentitud en la convergencia a la solución así como fallos en dicha convergencia.

El modo de solucionar el problema de la estimación de estado es mediante una secuencia de puntos x_0, x_1, x_2, \dots . En cada iteración se resuelve una parte del problema general en el que el siguiente punto x_{k+1} se calcula a partir del punto x_k y del valor del parámetro p (impedancias, tensiones, etc.). Esto se puede representar mediante la siguiente función: $x_1 = f(x_0, p)$, $x_2 = f(x_1, p)$, \dots . Este proceso converge si x_n se aproxima a la solución x .

Por otro lado, como consecuencia de que un número x_1 se almacena mediante una aproximación x_1^* aparece el error de redondeo que es la diferencia de ambos números. El efecto del error de redondeo es que en lugar de utilizar $x_2 = f(x_1, p)$, en los cálculos se emplea $x_2^* = f(x_1^*, p^*)$.

Un algoritmo se dice que está mal condicionado si para un (x_1, p) dado, la diferencia entre $f(x_1, p)$ y $f(x_1^*, p)$ o entre $f(x_1, p)$ y $f(x_1, p^*)$ es grande siendo x_1 y x_1^* o p y p^* valores muy próximos y por lo tanto da idea de cómo de amplificadas pueden quedar los errores en la solución ante errores en los datos de entrada. El mal condicionamiento ocurre cuando:

- Existe disparidad en los factores de peso [15].
- Existe un número elevado de medidas de inyección [44].
- Existe conexión entre líneas de transmisión cortas y largas [66].

A las medidas se les asignan diferentes factores de peso dependiendo de la credibilidad que se les dé. Así, un valor elevado de dicho factor indica que la medida es muy parecida a su valor exacto y, al contrario, si la credibilidad que nos ofrece la medida es muy pequeña, su factor de peso será bajo. Un ejemplo de mal condicionamiento cuando existe disparidad en los factores de peso es asignar valores grandes a las medidas virtuales, es decir, se considera que se trata de medidas más exactas, y pequeños a las pseudomedidas, es decir, se considera que se trata de medidas menos exactas.

Se han propuesto diversos métodos para resolver el problema del mal condicionamiento numérico:

- Ecuaciones normales con restricciones [15, 99].
- Transformaciones ortogonales [82, 83, 97].
- Método híbrido [66].
- Método de la matriz aumentada de Hachtel [38, 56, 100].
- Método de pseudoinversas o de Peters y Wilkinson [18, 25, 44, 75].
- Método de la matriz aumentada por bloques [10, 74].

En el Apéndice A se analizan estos métodos en detalle.

En [10] se revisan los principales métodos de resolución del problema de estimación de estado y en [47] se comparan los siguientes métodos

- Método de ecuaciones normales convencionales.
- Método de ecuaciones normales con restricciones.
- Método de transformaciones ortogonales.
- Método híbrido.
- Método de la matriz aumentada de Hachtel.

desde el punto de vista de:

- Estabilidad numérica.
- Eficiencia computacional.
- Complejidad en la realización.

En dicho artículo se obtiene la conclusión de que el método híbrido y el de Hachtel son los que ofrecen mejores compromisos entre estabilidad numérica y eficiencia computacional, ya que, aunque el método de transformaciones ortogonales es numéricamente más estable, no se puede realizar con el método desacoplado rápido.

2.4 Resultados de la estimación de estado

El estimador procesa toda la información disponible del sistema interconectado y genera una base de datos para las funciones de control y reparto. Los resultados de la estimación de estado son los estimados de las variables del sistema eléctrico que pueden incluir la generación, las cargas activas y reactivas, los flujos de potencia activa y reactiva de las líneas de transmisión y las magnitudes y las fases de los ángulos de las tensiones en los nudos.

Con esta información se puede determinar, mediante el análisis de sensibilidad, cómo afectan los errores del modelo del sistema a los resultados de la estimación de estado. Además, se pueden calcular las matrices de covarianza de la estimación y residual que permitirán evaluar la bondad de la estimación así como detectar errores no gaussianos (Apartado 2.5.2).

Asimismo, la información proporcionada por el estimador de estado o la que se puede obtener fácilmente de él, influirá en:

1. Las funciones de control:

- El control de carga y frecuencia. Es necesario obtener la estimación óptima de los flujos de potencia e inyecciones, especialmente de las medidas que no se realizan en tiempo real pero que se estiman y actualizan periódicamente por el operador.
- El despacho óptimo de las potencias activa y reactiva. Éste se basa en los nudos de carga, pudiendo realizar el estimador la estimación de las cargas no telemidas.
- La supervisión de la seguridad. El estimador de estado debe suministrar en tiempo real la información necesaria para la inspección periódica de la generación, las cargas de las líneas, las tensiones de los nudos, la estabilidad transitoria de la red y la predicción de los efectos de las posibles contingencias.
- La mejora de los sistemas de seguridad. Se genera una base de datos en tiempo real que permite la realización del análisis de seguridad y la detección de anomalías.
- El programa de descargos. Éste va a depender de las conclusiones que se obtengan de los análisis que se realizan de los efectos que pueden producir dichos cortes sobre la seguridad del sistema. Las variables estimadas pueden servir de base para estos análisis.

2. El operador:

- Proporcionándole, junto con sus respectivas desviaciones típicas, el estimado de los flujos de las líneas, las salidas de generadores, cargas, niveles de tensión, ángulos de las fases, etc.
- Indicándole las anomalías del sistema y su localización geográfica e informándole sobre los problemas de la red.
- Proporcionándole salidas no registradas y su localización geográfica que le ayudarán en el diagnóstico de defectos.
- Informándole de los costes marginales de potencia en los nodos importantes y en los de intercambio.
- Facilitándole índices de seguridad tales como reservas de generación y transmisión o los márgenes de estabilidad transitoria para alertarle mientras se encuentre el sistema en un estado vulnerable.
- Proporcionándole las acciones correctoras requeridas para solucionar las condiciones indeseables de potencia y tensiones y los procedimientos de restablecimiento del sistema.

3. El diseño y la planificación de los sistemas de información:

- Facilita el proceso de localización y definición de la exactitud de los sensores necesarios para mejorar algunas variables de estado con el menor coste posible.

La estimación de estado obtendrá, según se ha deducido en el Apartado 2.3, el estado estadísticamente óptimo. Este estado estimado constituye la base de datos sobre la que trabajan el resto de las funciones del centro de control pero tiene algunas limitaciones que el operador debe conocer. Ser conscientes de ellas evitará sorpresas y desconfianza en la estimación de estado. Estas limitaciones son:

1. Los cambios de estado no comunicados en áreas no observables pueden dar lugar a resultados erróneos.
2. Los resultados de la inyección en los nudos pueden no ser realistas, ya que las inyecciones múltiples en los nudos no pueden ser estimadas individualmente y los errores no gaussianos no siempre se pueden identificar individualmente.
3. Los errores no gaussianos en medidas críticas no pueden ser detectados.
4. Se acepta que las posiciones de los interruptores son correctas aunque pueden no serlo.
5. El test de la χ^2 para la detección de errores no gaussianos no es siempre seguro.

Seguidamente se procederá a realizar una discusión en detalle de cada una de estas limitaciones.

Áreas no observables

El modelo de red utilizado por la estimación de estado incluye habitualmente redes que están fuera del ámbito de influencia del centro de control. Tales áreas no observables pueden ser partes de redes de tensiones inferiores o partes de interconexiones con sistemas externos. Para la estimación de estado estas subredes son no observables permanentemente. Además, algunas zonas de la red que están siendo controladas pueden pasar a no observables debido a la pérdida de una medida crítica, a un fallo en el terminal remoto o en las vías de

comunicación, o simplemente porque en dicha subestación se está realizando mantenimiento o está siendo reparada la unidad remota.

Con objeto de convertir en observables todas esas zonas no observables se utilizan las pseudomedidas, las cuales se basan en las últimas medidas y en datos históricos. Por lo tanto, la estimación de estado realiza una función que un operador podría realizar de una manera más lenta y proporciona una información que el SCADA no puede suministrar.

Si el periodo durante el cual las zonas no observables permanecen en este estado es elevado, la estimación de estado puede no ser correcta, no por causa de las pseudomedidas, sino por la posibilidad de cambios en el estado de dicha zona.

Cuando se produce una isla no observable debido a una red de tensión inferior, si la no observabilidad se debe a la pérdida o a la no disponibilidad de una medida crítica, se puede subsanar este problema comunicando el cambio del estado desde la subestación al centro de control y se actualizaría el sistema.

Sin embargo, si la no observabilidad se debiese a la imposibilidad de acceder a la subestación por cualquier razón, entonces los cambios no se registrarían. Si el periodo de indisponibilidad llega a ser excesivamente prolongado, el operador podría recibir información telefónica desde la subestación por el personal de operación o mantenimiento y si fuese necesario, debido a la importancia de la subestación, tendría que haber personal que la controlase en modo local temporalmente.

Por último, si la zona no observable no es demasiado extensa, un cambio en un interruptor se podría notar e incluso identificar en las zonas observables adyacentes.

Resultados de la inyección en los nudos de la estimación de estado

Con objeto de que el usuario final, por ejemplo el operador del sistema, aprecie el valor de la estimación de estado y tenga confianza en sus resultados, es necesario tener un especial cuidado en la determinación y presentación de si las inyecciones en los nudos son simples o múltiples.

En ciertos casos, la distribución de la inyección estimada en un nudo entre los generadores y las cargas del mismo puede dar lugar a situaciones absurdas si no se tiene un especial cuidado. Puede ocurrir que:

- Las salidas de los generadores sean muy superiores a su capacidad.
- Los generadores absorban potencia del nudo.

- Haya valores de cargas excesivamente elevados.
- Haya cargas que aporten potencia al nudo.
- Aparezca una carga que en realidad no existe.

Una vez que el estimador de estado ha obtenido su solución, la distribución de la inyección en el nudo entre los generadores y las cargas será tal que se eviten resultados como los indicados anteriormente. En aquellos lugares en los que la inyección estimada no pueda ser distribuida de una manera realista será necesario que se haga mención mediante algún comentario o indicación.

El algoritmo del estimador de estado estima la inyección en un nudo y no las inyecciones individuales. La distribución de la inyección entre las inyecciones individuales se realiza proporcionalmente a los valores medidos.

Esta es una buena aproximación mientras no existan datos con errores no gaussianos en una o más de las inyecciones. Si se detecta un error no gaussiano en la inyección no se puede identificar cuál de las inyecciones individuales es la que ha introducido el error. Sin embargo, es posible que se pueda identificar mediante métodos heurísticos.

Medidas críticas

Por definición, en estimación de estado un error en una medida crítica no puede ser identificado. Por lo tanto, dependerá del operador la decisión de si una medida crítica es correcta o no. Por este motivo, en la presentación de los resultados de la estimación de estado, las medidas críticas se identificarán de un modo especial.

Idealmente, habrá suficiente redundancia en el conjunto de medidas de manera que no haya medidas críticas. Con este criterio se asegura la redundancia local en la red pero en la práctica pueden existir varias medidas críticas.

El número de medidas críticas no permanece fijo. alguna de las medidas puede convertirse en crítica debido a la no disponibilidad de alguna medida o a que se rechace por ser detectada como medida con error no gaussiano.

La presentación al operador de las medidas que son críticas le permitirá saber que en caso de que exista algún error no gaussiano en dichas medidas no podrá ser identificado.

Topología de la red

En la estimación de estado se supone que la información que se tiene en la base de datos respecto a la posición abierta o cerrada de los interruptores y seccionadores es correcta. Esta suposición es cierta si es supervisada por medio del SCADA.

Se pueden producir errores en la estación remota debido a la pérdida de conexión, a un problema de un cable, un fallo en algún relé, alguna tarjeta, etc. Estos errores no suelen producirse pero si ocurriesen darían lugar a que el configurador de la red proporcionase un modelo erróneo de ésta.

Si el interruptor o seccionador no se supervisa a través del SCADA, la actualización de su posición la realiza manualmente el operador tras una serie de operaciones que el operario de campo realiza. Puede ocurrir que el operador se olvide de actualizar la posición de los equipos, lo que origina un error topológico en la red.

Este problema se puede obviar mediante el preprocesador del estimador de estado. Éste lo que realiza es la verificación de cada nudo y si el residuo de las potencias activa y reactiva superan un umbral se emite un mensaje que avisará al operador. Por lo tanto, si se produce algún error en la información que se tenga de un interruptor, ésta se detectaría por la correlación que existe entre la posición del interruptor y los flujos de las ramas.

Identificación de errores no gaussianos

En la mayoría de los centros de control se utiliza el test de la χ^2 para la detección de errores no gaussianos (se analizará en detalle en el Apartado 2.5.2). En la práctica este test no es siempre correcto, aun cuando sólo haya un único dato erróneo, especialmente en redes grandes.

En el caso de que haya múltiples errores no gaussianos el test de la χ^2 se ejecuta hasta un límite, es decir, después de que se hayan rechazado los errores con los mayores residuos, el test puede indicar que no existen más errores cuando en verdad sí existen.

Por ello es conveniente que en la pantalla de ajuste de parámetros del estimador de estado se presente la facilidad de que el operador pueda evitar la realización del test de la χ^2 . De esta manera el proceso irá directamente a la rutina de identificación mediante el examen de los residuos normalizados.

Hay que destacar que, incluso si no se detectan todos los errores no gaussianos, el estimador de estado puede ofrecer una estimación muy parecida al valor verdadero.

2.5 Aspectos relacionados

2.5.1 Observabilidad

La estimación de estado procesa un conjunto de medidas redundantes que permite estimar el estado del sistema de potencia. Para ello utiliza las medidas analógicas junto con la configuración del sistema proporcionada por el procesador topológico, los parámetros de la red y quizá alguna pseudomedida. Si el conjunto de medidas es suficiente en número y geográficamente bien distribuidas, el estimador de estado proporcionará un estimado del estado del sistema y la red será observable.

Por lo general un sistema se diseña para ser observable en la mayoría de las condiciones de operación aunque temporalmente puede no serlo debido a que se produzcan cambios no previstos en la topología de la red o fallos en los sistemas de comunicación.

Un análisis de observabilidad debe incluir:

- Test de observabilidad.
- Identificación de redes observables.
- Ubicación de medidas.

La mayoría de los algoritmos de observabilidad se basan en una aproximación al modelo de red linealizado desacoplado similar al modelo en el que se analizan separadamente las porciones de la red $(P - \theta)$ y $(Q - V)$. Así, en la práctica se analizan separadamente la observabilidad de $(P - \theta)$ y $(Q - V)$, ya que en condiciones de operación normales sólo hay un ligero acoplamiento entre las fases y los flujos de potencia reactiva y entre las tensiones y los flujos de potencia activa.

Por lo tanto el vector de estado se puede dividir en

$$x = \begin{bmatrix} \theta \\ V \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

donde θ es el vector de fases de las tensiones de los nudos cuya dimensión es $N - 1$, siendo N el número de nudos de la red y V es el vector de tensiones de los nudos cuya dimensión es N . De una manera análoga, el vector de telemidas z se puede dividir en dos subvectores z_P y z_Q , conteniendo z_P las telemidas

de potencia activa y z_Q las telemidas de potencia reactiva y las medidas de tensiones. De este modo las ecuaciones de las medidas quedan:

$$\begin{bmatrix} z_P \\ z_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_P(\theta, V) \\ h_Q(\theta, V) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \nu_P \\ \nu_Q \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

Igualmente, la matriz jacobiano se puede escribir como:

$$H = \begin{bmatrix} H_{P\theta} & H_{PV} \\ H_{Q\theta} & H_{QV} \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

En las condiciones de operación normales en las que las magnitudes de las tensiones de la red están próximas a uno en por unidad y las diferencias entre ángulos entre nudos adyacentes son pequeñas hay poco acoplamiento entre z_P y V y entre z_Q y θ . Por lo tanto, una aproximación al modelo de red desacoplado lineal modela exactamente las relaciones entre dichas cantidades. En este modelo la matriz jacobiano de las medidas se aproxima mediante

$$H \approx \begin{bmatrix} H_{P\theta} & 0 \\ 0 & H_{QV} \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

y, de forma análoga, la matriz jacobiano de restricciones se puede aproximar por

$$C \approx \begin{bmatrix} C_{P\theta} & 0 \\ 0 & C_{QV} \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

El modelo aproximado desacopla las ecuaciones de las medidas y las restricciones en las ecuaciones de $(P - \theta)$ y $(Q - V)$:

$$\Delta z_P = H_{P\theta} \Delta \theta + \nu_P \quad (2.28)$$

$$0 = C_{P\theta} \Delta \theta \quad (2.29)$$

y

$$\Delta z_Q = H_{QV} \Delta V + \nu_Q \quad (2.30)$$

$$0 = C_{QV} \Delta V \quad (2.31)$$

Como consecuencia, el test de observabilidad de las ecuaciones $(P - \theta)$ y $(Q - V)$ se puede realizar separadamente y por lo tanto, el análisis que se desarrolla a continuación se referirá al problema activo.

En [67, 68, 69] se propone un test numérico de observabilidad basado en la determinación del rango de H mediante la factorización triangular de la matriz de ganancia:

$$G = H^T W H = U^T U \quad (2.32)$$

Si H es de rango N , entonces G es no singular y se puede hallar una matriz triangular superior U tal que $U_{ii} > 0, i = 1, 2, \dots, N$. Por otro lado, si el rango de H es menor que N , es decir, $N - l$, entonces el proceso de factorización finalizará y U será de la forma

$$U = \begin{bmatrix} U_{11} & U_{12} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

donde U_{11} es una matriz triangular superior de dimensión $(N - l) \times (N - l)$ y elementos diagonales positivos.

Como se puede ver en el Apéndice A, la matriz de coeficientes del método de la matriz aumentada de Hachtel es (A.17):

$$K = \begin{bmatrix} 0 & 0 & C \\ 0 & \alpha W^{-1} & H \\ C^T & H^T & 0 \end{bmatrix} \quad (2.34)$$

En [100] se propone un método de observabilidad numérica basado en esta matriz de coeficientes. Si la red es observable entonces K es no singular.

En la práctica, con aritmética de precisión finita, los elementos de la matriz que teóricamente tienen valor cero debido a sustracciones no lo serán exactamente. Por ello, es necesario un umbral numérico para los elementos de U y declarar que todos los elementos de U cuyos valores sean inferiores a dicho umbral son cero. La elección de dicho umbral dependerá tanto de la red como del ordenador utilizado.

Para la determinación de la observabilidad también existen métodos topológicos como los propuestos en [40, 53, 72].

Aun cuando la red no sea observable es deseable determinar una porción del estado estimado. Esto se puede realizar:

- Utilizando pseudomedidas que aumenten las medidas obtenidas en tiempo real.
- Calculando el estado estimado de la porción de red que es observable.

En el primer caso, además de las medidas obtenidas en tiempo real se utilizan las pseudomedidas. Éstas son normalmente inyecciones en nudos cuyos valores se estiman mediante algún tipo de previsión de carga en el nudo y se localizan en aquellos cuyas inyecciones no son medidas.

Cuando se detecta que una red no es observable se puede utilizar un algoritmo de observabilidad que permita procesar una lista de pseudomedidas candidatas y que determine el número mínimo necesario de éstas para que la red sea observable. Es importante que el conjunto de pseudomedidas utilizadas sea mínimo debido a que un número excesivo de éstas puede degradar la exactitud de la estimación de la porción observable de la red. En [26] se referencian diversos métodos de procesamiento de las pseudomedidas.

Si lo que se hace es determinar la porción observable de la red y calcular el estado estimado de esa zona solamente, se puede utilizar el método propuesto en [68] que se basa en que cuando H no es de rango completo, según (2.33), U tiene un bloque de ceros en su parte inferior. Utilizando como medidas ficticias flujos de potencia nulos en la red, entonces todos los nudos que pertenecen a la misma isla observable tienen la misma fase y resolviendo el sistema mediante eliminación gaussiana se obtiene el siguiente sistema de ecuaciones:

$$\begin{bmatrix} U_{11} & U_{12} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.35)$$

o

$$U_{11}\theta_1 = -U_{12}\theta_2 \quad (2.36)$$

El número de islas observables es igual a la dimensión de θ_2 , incluyendo las triviales que sólo contienen un nudo. Una vez resuelta la ecuación anterior para θ_1 , todos los nudos que tengan la misma fase pertenecen a la misma isla. La unión de todas las islas observables que contienen más de un nudo identifica la porción observable de la red.

La porción de red observable se puede identificar también utilizando un algoritmo topológico como los propuestos en [23, 72].

Como se dijo anteriormente, un análisis de observabilidad debe incluir también el estudio de la ubicación de medidas. El diseño de un sistema de medidas que permita realizar la estimación de estado es un problema complejo, no sólo por el tamaño del problema, sino también por los requerimientos de la exactitud del estimador, seguridad ante fallos en los transductores, facilidad de adaptación ante cambios en la topología de la red y minimización del costo del sistema.

Una formulación rigurosa del emplazamiento óptimo de las medidas se basaría en la resolución de un problema de programación binario (0 ó 1) ya que una determinada medida en un punto determinado o se encuentra presente o no se encuentra. Pero este tipo de problemas en sistemas de gran dimensión son muy difíciles de resolver de una manera exacta, por lo que los sistemas propuestos para el emplazamiento de las medidas se basan en la formulación de problemas no rigurosos, en técnicas de resolución heurísticas o en una combinación de ambos.

Los primeros planteamientos del problema se hicieron en [13, 35, 80] pero ninguno de estos métodos propuestos ha proporcionado un procedimiento sistemático que pueda utilizarse como criterio de emplazamiento óptimo de las medidas.

En [50] se describe un procedimiento heurístico, denominado método de eliminación secuencial, que se utiliza para determinar un conjunto de medidas. Se define un vector y de dimensión k que se desconoce debido a los errores aleatorios que existen en las medidas. Los componentes de dicho vector son las denominadas cantidades de interés.

El sistema de medidas se elige optimizando la exactitud de y mediante la formulación del siguiente problema de optimización:

$$\begin{aligned} \text{minimizar } J &= \sum_{i=1}^k \sigma_{y_i}^2 / \beta_i^2 \\ \text{sujeto a: } \sigma_{y_i}^2 &\leq \beta_i^2 \end{aligned} \quad (2.37)$$

siendo:

$\sigma_{y_i}^2$ la varianza de la variable aleatoria y_i .

β_i^2 un determinado límite superior de $\sigma_{y_i}^2$.

Para poder evaluar J es necesario calcular los elementos de la diagonal de la matriz de covarianzas de y , P_y .

El método comienza utilizando medidas en todos los posibles nudos del sistema y posteriormente se van eliminando sistemáticamente las medidas una a una. Analizando un momento determinado del proceso, la medida que provoca el menor incremento de J y no causa violaciones en las restricciones de desigualdad es la que se eliminará.

La eliminación de las medidas finalizará cuando al eliminar alguna de las que queden se provoque una violación de las restricciones o cuando se alcance un número de medidas especificado.

Este método tiene dos defectos: las restricciones económicas no se modelan directamente y la técnica de optimización es heurística. Debido a este segundo defecto, no se garantiza que se llegue a una solución globalmente óptima.

Basándose en modificaciones y extensiones de este método, en [1] se describe otra metodología de emplazamiento de las medidas. En lugar de calcular P_y analíticamente se utiliza la simulación de Monte Carlo, ya que el cálculo de P_y es muy costoso para sistemas de gran dimensión. El método propuesto se divide en tres fases.

En la primera fase se utiliza el método de [50] para seleccionar las medidas que se van a eliminar. Esta fase continúa hasta que se alcanza un determinado nivel de redundancia. En la segunda fase, un determinado número de medidas adicionales se eliminan utilizando el mismo método de eliminación de la fase anterior. Esto se realiza con objeto de permitir la reinserción de medidas en la tercera fase del algoritmo. En la tercera fase, las medidas se añaden con objeto de disminuir la sensibilidad de J a la pérdida de medidas y datos con errores no gaussianos. Esta tercera fase continúa hasta que el número de medidas añadidas sea igual al de eliminadas en la segunda fase.

Este método se ha usado ampliamente en la red de transporte noruega habiéndose obtenido buenos resultados tanto cuando el conjunto de medidas iniciales como cuando las condiciones de carga cambian. Sin embargo, el método es sensible a la variación de la topología de la red, por lo que se recomienda la utilización de puntos de medida adicionales que permitan al sistema de medidas ser más robusto ante cambios topológicos.

2.5.2 Detección de errores no gaussianos

Los errores no gaussianos pueden ser debidos a:

- Errores en los parámetros tales como posicionamiento incorrecto del intercambiador de tomas, modelado incorrecto de los transformadores o incorrectas impedancias de ramas.
- Topología de la red incorrecta, debido posiblemente a la actualización manual de las posiciones de los interruptores o a la descripción incorrecta de la topología de la red.
- Dispositivos de medidas erróneos o errores en la transmisión de datos.

Los errores de las medidas se pueden clasificar en uno de los siguientes grupos:

- Error extremo: $|\text{medida} - \text{valor exacto}| > 20 \sigma$.
- Error grosero: $|\text{medida} - \text{valor exacto}| = (5 \div 20) \sigma$.
- Ruido normal: $|\text{medida} - \text{valor exacto}| < 5 \sigma$.

Aunque los errores pertenezcan al primer grupo, si la redundancia local lo permite, pueden ser filtrados mediante un análisis previo antes de comenzar las iteraciones de la estimación de estado. Los errores del segundo grupo son peligrosos debido a que pueden conducir a resultados no fiables, por ello estos son los errores de los que se ocupa el módulo de análisis de errores no gaussianos.

El análisis de errores no gaussianos consta de tres etapas:

1. Determinación de la presencia de errores no gaussianos.
2. Identificación de qué medidas son erróneas.
3. Eliminación de las medidas erróneas del estado estimado o su sustitución.

La presencia de medidas erróneas queda reflejada en los residuos de las medidas, es decir, en la diferencia entre los valores de las telemidas y las estimadas [98], y se plantea como un problema de test estadístico con las siguientes hipótesis:

- H_0 : No existen medidas erróneas.
- H_1 : Lo anterior es falso.

Para proceder a la aceptación de una de las dos hipótesis se utiliza el test del índice $J(x)$:

$$J(x) = \nu^T W \nu \quad (2.38)$$

siendo

$$\nu = z - h(x) \quad (2.39)$$

$J(x)$ se obtiene como suma de los cuadrados de variables aleatorias independientes con distribución normal cuya media es 0 y su desviación típica es σ , por lo que $J(x)$ es una χ^2 de Pearson de k grados de libertad:

$$\chi^2 = \nu_1^2 + \nu_2^2 + \nu_3^2 + \dots + \nu_k^2 \quad (2.40)$$

con

$$k = m - n \quad (2.41)$$

$$n = 2N - 1 \quad (2.42)$$

Si el valor calculado de $J(x)$ es menor que un cierto umbral χ_α se acepta la hipótesis H_0 y en caso contrario H_1 . El valor χ_α es una constante que se calcula de la distribución χ^2 . Dicha constante se elige de forma que la probabilidad de rechazar la hipótesis H_0 , supuesta ésta cierta, sea $1 - \alpha$, en donde α es el nivel de confianza.

Después de la detección de medidas erróneas se procede a identificar cuáles son. La identificación se basa en suponer que la medida de mayor residuo normalizado es errónea.

Sea r_x el residuo de las variables de estado y r el residuo de las medidas:

$$r_x = x - \hat{x} \quad (2.43)$$

$$r = z - \hat{z} \quad (2.44)$$

donde \hat{x} es la variable estimada y \hat{z} es la medida estimada.

Considerando

$$z = h(x) + \nu \quad (2.45)$$

con

$$E(\nu) = 0 \quad (2.46)$$

$$E(\nu\nu^T) = R \quad (2.47)$$

se puede demostrar [33] que (ver Apéndice B):

$$E(r_x) = 0 \quad (2.48)$$

$$E(r_x r_x^T) = P_x = (H^T W H)^{-1} = G^{-1} \quad (2.49)$$

$$E(r r^T) = P_z = R - H G^{-1} H^T \quad (2.50)$$

siendo P_x la matriz de covarianzas de la estimación y P_z la residual. Por lo tanto, los residuos tienen una distribución normal con media cero y covarianza igual a los elementos de la diagonal de P_z y $J(x)$ es una χ^2 de $m - n$ grados de libertad.

Si $J(x) > \chi_{m-n,p}^2$ se puede deducir, con una probabilidad de error p , que al menos una medida es errónea, siendo la medida que tiene mayor residuo normalizado r_N la que se considera errónea [19] y siendo

$$r_N = \frac{r_i}{\sqrt{(P_z)_{ii}}} \quad (2.51)$$

Para identificar el dato erróneo es necesario calcular los elementos de la diagonal de P_z :

$$(P_z)_{ii} = R_{ii} - \sum_j \sum_k H_{ij} (H^T W H)^{-1}_{jk} H_{ki}^T \quad (2.52)$$

De aquí se deduce que los elementos $(H^T W H)^{-1}_{jk}$ necesarios son aquellos que cumplen que $H_{ij} H_{ij}^T \neq 0$, por lo que sólo están implicados los elementos de la matriz $H^T W H$ que son distintos de cero antes de invertir y se puede utilizar el método de la matriz inversa dispersa [92, 105] como se detalla a continuación.

Sea A una matriz simétrica dispersa cuya inversa es Z :

$$AZ = I \quad (2.53)$$

y siendo I la matriz unitaria.

Sustituyendo A en (2.53) por su forma factorizada:

$$LDL^T Z = I \Rightarrow L^T Z = D^{-1} L^{-1} \quad (2.54)$$

Definiendo la matriz $T = I - L^T$ se puede expresar (2.54) como:

$$Z = D^{-1} L^{-1} + TZ \quad (2.55)$$

siendo D una matriz diagonal y T una matriz triangular superior cuya diagonal es cero.

De este razonamiento hay que hacer especial mención de que:

- La matriz L es una matriz triangular cuya diagonal es unitaria y por lo tanto, su inversa tiene las mismas propiedades, es decir, la diagonal de $D^{-1} L^{-1}$ es igual a D^{-1} .
- La matriz Z es simétrica debido a que A lo es, por lo que para calcular Z es suficiente con calcular su parte superior Z_s , es decir, los elementos Z_{ij} tales que $j \geq i$.

Por lo tanto, L^{-1} no se utiliza en el cálculo de Z_s , siendo:

$$Z_s = D^{-1} + TZ \quad (2.56)$$

Hay que destacar que debido a la peculiar estructura de T , el cálculo de los elementos de la fila k de Z_s sólo requiere el uso de los elementos de las filas procesadas anteriormente:

$$z_{ii} = d_{ii} + \sum_k t_{ik} z_{ki} \quad (2.57)$$

$$z_{ij} = \sum_k t_{ik} z_{kj} \quad (2.58)$$

siendo $k > i$, y que para calcular z_{ij} es necesario encontrar previamente todos los elementos z_{kj} con k tal que $t_{ik} \neq 0$.

Por último se procede a la eliminación de las medidas erróneas o a su sustitución por

$$z_i^n = z_i^e - \frac{\sigma_i^2}{\sqrt{(P_z)_{ii}}} (z_i^e - \hat{z}_i) \quad (2.59)$$

siendo:

z_i^n la medida nueva.

z_i^e la medida errónea.

\hat{z}_i la medida estimada.

Existen dos formas de sustituir o eliminar las medidas falsas:

- Eliminación ordenada.
- Eliminación por grupos.

En el primer caso se sustituye la medida cuyo residuo sea mayor y se vuelve a estimar el estado con la nueva medida. Si la detección vuelve a ser positiva se sustituye la medida que tenga ahora el mayor residuo y así sucesivamente.

En el segundo caso se sustituyen todas las medidas correspondientes a residuos mayores a un cierto valor.

2.6 Resumen

En este capítulo se ha presentado el problema que existía en la operación de los sistemas de potencia y el cambio de mentalidad producido hacia los nuevos sistemas de seguridad. Al producirse este cambio fue cuando emergió con gran

fuerza la estimación de estado como solución a los problemas de inconsistencia y seguridad planteados.

Se han estudiado los datos de entrada necesarios para el estimador de estado (Apartado 2.2), que además de los datos proporcionados por el SCADA necesita los valores de los parámetros, la información topológica, el modelo matemático del sistema y las pseudomedidas. En este mismo apartado se han analizado los parámetros que definen la exactitud de la medida y se ha justificado la utilización de la clase como único parámetro para definirla.

Seguidamente se han analizado las propiedades del estimador de máxima verosimilitud, las causas de mal condicionamiento y el método de ecuaciones normales para la resolución del problema de estimación de estado (Apartado 2.3). A continuación, se han estudiado los resultados que se obtienen de la estimación de estado (Sección 2.4), justificándose los motivos para realizarla, así como la influencia que tiene ésta sobre las funciones de control, el operador y la planificación. Igualmente se han remarcado las limitaciones que tiene la estimación y que deben quedar completamente claras para el operador con objeto de que éste pueda subsanarlas.

Por último, se han estudiado someramente la observabilidad y la detección de errores no gaussianos (Epígrafe 2.5) como dos de los aspectos más relacionados con la estimación de estado. En concreto, en el Subapartado 2.5.1 se han estudiado las partes de que consta un análisis de observabilidad:

- Test de observabilidad.
- Identificación de redes observables.
- Ubicación de medidas.

y en el Subapartado 2.5.2 se han analizado las causas que pueden producir errores no gaussianos y se han estudiado las etapas del análisis de errores no gaussianos:

- Determinación de la presencia de errores no gaussianos.
- Identificación de qué medidas son erróneas.
- Eliminación o sustitución de las medidas erróneas del estado estimado.

Capítulo 3

Estimación de Parámetros en Redes Eléctricas

3.1 Introducción

Los algoritmos de estimación de estado que habitualmente se utilizan están basados en la suposición de que los parámetros de las líneas (resistencia, reactancia, tomas de los transformadores, etc.) y el estado de los interruptores son perfectamente conocidos, aunque esto no es del todo correcto.

Así, mientras que los errores en los estados de los interruptores afectan a la topología de la red produciendo grandes inconsistencias en las medidas estimadas y pueden ser fácilmente identificables, los errores en las impedancias de las ramas son menos visibles y pueden producir errores en los datos proporcionados por el estimador continuamente y durante grandes periodos de tiempo sin que dichos errores se detecten.

Estos errores en los parámetros, tales como:

- Incorrectas impedancias de ramas.
- Modelado incorrecto de los transformadores o posicionamiento incorrecto del intercambiador de tomas.

pueden ser debidos a:

- Datos erróneos facilitados por el fabricante.
- Errores en la calibración.

- Discrepancias entre la longitud real de las líneas y la de diseño.
- Cambio de las tomas de transformadores por parte de personal de campo sin que se lo haya comunicado al Centro de Control, etc.

y pueden producir:

- Una degradación significativa de la exactitud de los resultados del estimador de estado y, como consecuencia, de los resultados de los programas cuyos datos de entrada son los de salida del estimador.
- Una detección de medidas erróneas que realmente no lo son, debido a su inconsistencia con los parámetros erróneos.
- Una reducción de la confianza del operador en el estimador de estado.

Para realizar la estimación de parámetros es necesario identificarlos previamente mediante uno de los métodos existentes, procediendo posteriormente a estimar únicamente aquéllos que han sido identificados.

Desde el punto de vista del estimador de estado, un error en un parámetro tiene el mismo efecto que un conjunto de errores correlacionados que actuaran sobre todas las medidas que afectan a la rama errónea, es decir, las medidas de flujo sobre la rama y las de inyecciones en los nudos extremos de ella, por lo que será de suma importancia su estimación.

3.2 Identificación de errores en los parámetros

Como se ha mencionado en el Apartado 3.1, un error en un parámetro tiene el mismo efecto que un conjunto de errores correlacionados que actuaran sobre todas las medidas que afectan a la rama errónea. Esto se puede deducir manipulando el modelo de la medida (2.7):

$$z_s = h_s(x, p) + \nu_s = h_s(x, p^*) + [h_s(x, p) - h_s(x, p^*)] + \nu_s \quad (3.1)$$

siendo p el valor exacto del parámetro de red, p^* el valor erróneo del parámetro de red y el subíndice s hace referencia a las medidas involucradas únicamente.

El término que aparece entre corchetes en la ecuación (3.1) actúa como un error adicional de la medida. Si el error del parámetro es bastante grande, este término provocará su detección como medida con error no gaussiano y

las medidas estarán entre las que se encuentran con residuos más grandes [76, 77, 94]. Este error se puede linealizar de la siguiente forma:

$$h_s(x, p^*) - h_s(x, p) \approx \left[\frac{\partial h_s}{\partial p} \right] e_p \quad (3.2)$$

siendo $e_p = p^* - p$ el error del parámetro .

Por lo tanto, aquellas ramas cuyas medidas asociadas tengan un residuo normalizado elevado serán sospechosas y habrá que realizar la estimación sobre ellas.

En [57] se realiza la suposición de que los datos con errores no gaussianos han sido identificados y eliminados previamente por lo que una presencia persistente de un término de sesgo en ciertos residuos de medida en los resultados de la estimación de estado es una indicación de la presencia de errores en los parámetros y puede utilizarse para detectar dicha presencia.

En [58] el método propuesto para proceder a la indentificación de errores también se basa en el cálculo de los residuos normalizados, por lo que un residuo normalizado elevado puede indicar que alguno de los parámetros no es correcto en la proximidad de la medida y la estimación sólo se lleva a cabo si se detecta la existencia de parámetros erróneos.

El método propuesto en [89], concebido para la estimación de tomas de transformadores, se llevará a cabo si la diferencia entre la potencia reactiva teled medida y la calculada en dichos transformadores es superior a un umbral fijado.

Por lo tanto, la identificación de errores en los parámetros se basa fundamentalmente en el estudio de los residuos de las medidas.

3.3 Clasificación de los métodos de estimación de parámetros

Mientras que la estimación de estado ha sido estudiada con bastante profusión [28] desde que Schweppe publicó su artículo en 1970 [80], la estimación de parámetros no lo ha sido y son relativamente escasos los artículos que han desarrollado este tema. A pesar de ello se han realizado dos clasificaciones sobre los métodos de estimación de parámetros:

1. En [76, 77, 94] la clasificación realizada es la misma, siendo ésta la siguiente:

- Métodos que utilizan un único vector de medidas:
 - Estimación simultánea del estado y del parámetro [5].
 - Estimación secuencial del estado y del parámetro [37, 81, 89].
- Métodos que utilizan varios vectores de medidas:
 - Estimador adaptativo [29].
 - Estimación secuencial múltiple del estado y del parámetro [81].

2. La clasificación realizada en [42] es la siguiente:

- Métodos que utilizan un único vector de medidas [57, 77].
- Métodos que utilizan varios vectores de medidas:
 - Estimación de parámetros invariables con el tiempo [29, 103].
 - Estimación de parámetros variables con el tiempo [86].

Ambas clasificaciones son similares y no recogen la singularidad propia de cada método. Por ello se propone la siguiente clasificación, la cual se presenta en [104]:

- Métodos que no amplían el vector de estado:
 - Utilización de residuos [37, 57, 73, 76, 77, 89, 94].
- Métodos que amplían el vector de estado:
 - Resolución mediante ecuaciones normales [5, 6, 21, 58, 93].
 - Resolución mediante filtro de Kalman [12, 22, 29, 30, 46, 86, 87, 88].

Esta clasificación resalta la diferencia más significativa de cada uno de los métodos, la ampliación o no del vector de estado mediante la introducción de los parámetros erróneos como variables adicionales, e indica la metodología utilizada en su resolución.

En dicha clasificación no se ha incluido [81] por tratarse de uno de los primeros trabajos que analizaron la estimación de parámetros y proponer un método que posteriormente no se ha desarrollado debido a la complejidad que implicaba.

3.4 Métodos que no amplían el vector de estado.

Los métodos que no amplían el vector de estado con los parámetros erróneos se basan para su resolución en el análisis de los residuos.

El método propuesto en [76, 77, 94] se basa en la relación de sensibilidad entre los residuos y los errores de las medidas [45] expuesto en el Apéndice B:

$$r = S_r \nu \quad (3.3)$$

donde S_r es la matriz de sensibilidad residual que, según se deduce en [63], es:

$$S_r = I - HG^{-1}H^T W \quad (3.4)$$

donde

$$G = H^T W H \quad (3.5)$$

es la matriz de ganancia según se vio en (2.20), y se puede establecer una relación lineal entre los residuos de las medidas afectadas r_s y el error del parámetro e_p , obteniéndose de las ecuaciones (3.1) y (3.3) que:

$$r_s = \left((S_r)_{ss} \frac{\partial h_s}{\partial p} \right) e_p + \bar{r}_s \quad (3.6)$$

donde $(S_r)_{ss}$ es la submatriz ($s \times s$) de S_r correspondiente a las s medidas involucradas y \bar{r}_s es el vector residual que se obtendría en ausencia de errores en los parámetros.

La ecuación (3.6) puede ser interpretada como un modelo lineal que relaciona las medidas r_s con el error del parámetro e_p en presencia de un ruido \bar{r}_s , lo que convierte la determinación de e_p en un problema de estimación.

En [77] se demuestra, basándose en (3.6), que el estimado óptimo de e_p es \hat{e}_p :

$$\hat{e}_p = \left[\left(\frac{\partial h_s}{\partial p} \right)^T W_s (S_r)_{ss} \left(\frac{\partial h_s}{\partial p} \right) \right]^{-1} \left(\frac{\partial h_s}{\partial p} \right)^T W_s r_s \quad (3.7)$$

La resolución de esta ecuación no es simple, por lo que se propone el siguiente método. De la ecuación (3.4) se obtiene:

$$W_s (S_r)_{ss} = W_s - W_s H_s G^{-1} H_s^T W_s \quad (3.8)$$

Se define el vector de dimensión n :

$$\delta_s = H_s^T W_s \left(\frac{\partial h_s}{\partial p} \right) \quad (3.9)$$

cuyos componentes vienen dados por:

$$\delta_{si} = \sum_{k=1}^s \frac{\partial h_k}{\partial x_i} \frac{\partial h_k}{\partial p} \frac{1}{\sigma_k^2} \quad (3.10)$$

con $i = 1, \dots, l$.

Utilizando (3.8) y (3.9), la ecuación (3.7) queda:

$$\begin{aligned} \hat{e}_p &= \left[\left(\frac{\partial h_s}{\partial p} \right)^T W_s \left(\frac{\partial h_s}{\partial p} \right)^T W_s H_s G^{-1} H_s^T W_s \left(\frac{\partial h_s}{\partial p} \right) \right]^{-1} \left(\frac{\partial h_s}{\partial p} \right)^T W_s r_s \\ &= \left[\left(\frac{\partial h_s}{\partial p} \right)^T W_s \left(\frac{\partial h_s}{\partial p} \right) - \delta_s^T G^{-1} \delta_s \right]^{-1} \left(\frac{\partial h_s}{\partial p} \right)^T W_s r_s \end{aligned} \quad (3.11)$$

pudiendo existir dos variantes:

1. Primera variante: Calculando previamente y_s de

$$G y_s = \delta_s \quad (3.12)$$

mediante eliminación hacia adelante y sustitución hacia atrás, el error del parámetro estimado se obtiene de:

$$\hat{e}_p = \left[\sum_{k=1}^s \left(\frac{\partial h_k}{\partial p} \right)^2 \frac{1}{\sigma_k^2} - \sum_{j=1}^l \delta_{sj} y_{sj} \right]^{-1} \sum_{k=1}^s \left(\frac{\partial h_k}{\partial p} \right) \frac{r_k}{\delta_k^2} \quad (3.13)$$

2. Segunda variante: Si la matriz G ha sido factorizada en

$$G = LDL^T \quad (3.14)$$

siendo L una matriz triangular inferior, el error del parámetro estimado se obtiene de:

$$\hat{e}_p = \left[\sum_{k=1}^s \left(\frac{\partial h_k}{\partial p} \right)^2 \frac{1}{\sigma_k^2} - \sum_{j=1}^l \tilde{y}_{sj}^2 \right]^{-1} \sum_{k=1}^s \left(\frac{\partial h_k}{\partial p} \right) \frac{r_k}{\delta_k^2} \quad (3.15)$$

obteniéndose \tilde{y}_s de

$$\sqrt{D} L \tilde{y}_s = \delta_s \quad (3.16)$$

mediante eliminación hacia adelante.

Resumiendo el método propuesto, dada una línea errónea o sospechosa el procedimiento para estimar uno de sus parámetros y corregir el estado estimado es el siguiente:

1. Identificar las medidas afectadas (flujos de potencia en la línea, inyecciones de potencia en los nudos extremos).
2. Si sólo se encuentra afectada una medida y se dispone del residuo normalizado, la ecuación (3.7) queda:

$$\hat{e}_p = \left(\frac{\partial h_s}{\partial p} \right)^{-1} \frac{r_s}{(S_r)_{ss}} \quad (3.17)$$

Obtener \hat{e}_p e ir al paso 4.

3. Si no es así:
 - (a) Calcular $\frac{\partial h_s}{\partial p}$, H_s , sustituir en la ecuación (3.9) y calcular δ_s .
 - (b) Obtener y_s o \tilde{y}_s de las ecuaciones (3.12) o (3.16).
 - (c) Sustituir en la ecuación (3.13) o (3.15) para obtener \hat{e}_p .
4. Corregir p^* haciendo $p^* = p^* + \hat{e}_p$.
5. Realizar una nueva estimación de estado y una nueva identificación de parámetros erróneos. Si es positivo ir al paso 2, o en caso contrario, parar.

El método propuesto en [57] es similar al propuesto en [76, 77, 94], basándose también en un análisis de sensibilidad residual a partir del vector de sesgo, el cual combina los efectos de los errores del parámetro y del estado del sistema, pero la estimación la realiza en dos etapas. Primero estima el vector de sesgo y posteriormente estima los errores a partir de una secuencia de vectores de sesgo obtenidos en distintos periodos.

La diferencia más significativa es que el vector de sesgo se expresa en términos de flujos. Dicho método está propuesto para ser ejecutado en tiempo real cuando se sospeche la existencia de algún parámetro erróneo.

Otro de los métodos basados en los residuos es el propuesto en [37] y aplicado posteriormente en [89]. Ambos están desarrollados para la estimación de tomas de transformadores, aunque en [37] se desarrolla además su aplicación a parámetros de redes.

El método propuesto se basa en el acoplamiento existente entre la toma del transformador y el flujo de potencia reactiva a través de él. Por ello lo que se analiza es la diferencia entre el flujo de potencia reactiva medido y calculado a través del transformador. Se desarrolla dentro del mismo módulo de estimación, por lo tanto se realiza en tiempo real.

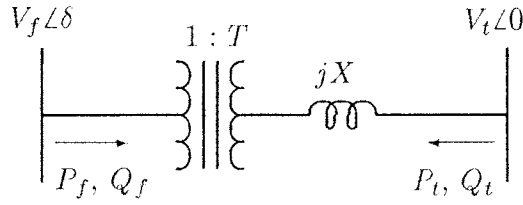


Figura 3.1: Modelo del transformador utilizado.

Considerando el modelo del transformador de la Figura 3.1, los flujos de potencia activa y reactiva desde la parte fija (f) a la de la toma (t) son:

$$P_f = \frac{V_f V_t T \text{sen}(\delta)}{X} \quad (3.18)$$

$$Q_f = \frac{V_f^2 T^2}{X} - \frac{V_f V_t T \text{cos}(\delta)}{X} \quad (3.19)$$

Suponiendo que se ha realizado un cambio ΔT y que las tensiones y ángulos de los nudos no han variado, entonces:

$$\Delta P_f = \frac{V_f V_t \text{sen}(\delta)}{X} \Delta T \quad (3.20)$$

$$Q_f = \left[\frac{2V_f^2 T}{X} - \frac{V_f V_t \text{cos}(\delta)}{X} \right] \Delta T \quad (3.21)$$

Suponiendo además que:

$$|\text{sen}(\delta)| \ll |\text{cos}(\delta)| \quad (3.22)$$

$$V_f \approx V_t \approx T \approx 1 \quad (3.23)$$

entonces

$$|\Delta P_f| \ll |\Delta Q_f| \quad (3.24)$$

$$\Delta Q_f \approx \frac{\Delta T}{X} \quad (3.25)$$

Utilizando un razonamiento similar, la variación del flujo de potencia reactiva en el lado de la toma del transformador es:

$$\Delta Q_t \approx -\frac{\Delta T}{X} \quad (3.26)$$

De todo ello se puede obtener como conclusión que:

- Los flujos de potencia reactiva son relativamente sensibles a los cambios de tomas.
- Los flujos de potencia activa son relativamente insensibles a los cambios de tomas.
- Los flujos de potencia reactiva son relativamente lineales con respecto a los cambios de tomas en el rango de $\pm 10\%$.

Basándose en la discusión anterior y realizando las siguientes definiciones:

- Q_t : Flujo de potencia reactiva calculado en el lado de la toma.
- Q_{mt} : Flujo de potencia reactiva medido en el lado de la toma.
- Q_f : Flujo de potencia reactiva calculado en el lado fijo.
- Q_{mf} : Flujo de potencia reactiva medido en el lado fijo.
- ΔT : Magnitud cambiada en la toma.

se puede establecer el siguiente procedimiento para la estimación de las tomas de los transformadores:

1. Si se dispone de una medida del lado de la toma:
 - (a) Si $Q_t - Q_{mt} < 0$ decreméntese la toma: $-\Delta T$.
 - (b) Si $Q_t - Q_{mt} > 0$ increméntese la toma: ΔT .
2. Si se dispone de una medida del lado fijo:
 - (a) Si $Q_f - Q_{mf} > 0$ decreméntese la toma: $-\Delta T$.
 - (b) Si $Q_f - Q_{mf} < 0$ increméntese la toma: ΔT .

Como medida práctica, si la diferencia entre los flujos de reactiva medido y calculado es inferior a un umbral, por ejemplo 1 MVAR, no se variará la posición de la toma.

Para aplicar este método a los parámetros de la red es necesario que se cumplan las siguientes condiciones:

- Debe disponerse de un residuo que sea insensible a los cambios de los parámetros de la línea de transmisión.
- Si existen otros errores deben de tener poca influencia sobre el residuo seleccionado.
- La medida correspondiente al residuo seleccionado debe de estar libre de errores.

Considerando que los flujos de potencia activa y reactiva entre dos nudos son:

$$P_{12} = \frac{V_1 V_2 \sin(\delta)}{X} \quad (3.27)$$

$$Q_{12} = \frac{V_1^2}{X} - \frac{V_1 V_2 \cos(\delta)}{X} - V_1^2 B_c \quad (3.28)$$

siendo

- P_{12} el flujo de potencia activa entre los nudos 1 y 2.
- Q_{12} el flujo de potencia reactiva entre los nudos 1 y 2.
- V_1 la tensión en el nudo 1.
- V_2 la tensión en el nudo 2.
- δ el desfase existente entre los nudos 1 y 2.
- B_c la susceptancia *shunt* de la línea, siendo la mitad en cada extremo de la línea.

y por encontrarse la potencia activa relativamente fijada, el residuo de la potencia reactiva es el que se puede utilizar para aplicar el método propuesto.

Para la susceptancia *shunt* de la línea:

$$\Delta Q_{12} = -V_1^2 \Delta B_c \quad (3.29)$$

por lo que los errores de flujo de reactiva son directamente proporcionales al parámetro B_c . Con objeto de estimar dicho parámetro es importante que la línea de transmisión esté ligeramente cargada de manera que el residuo sea debido principalmente a los errores de B_c .

Para analizar los errores en la reactancia serie de la línea, de las ecuaciones (3.27) y (3.28) se obtiene:

$$P_{12}\Delta X = V_1 V_2 \cos(\delta) \Delta \delta \quad (3.30)$$

$$(Q_{12} + V_1^2 B_c) \Delta X + X \Delta Q_{12} = V_1 V_2 \sin(\delta) \Delta \delta \quad (3.31)$$

de donde:

$$\frac{\delta Q_{12}}{\delta X} = \frac{P_{12} \tan(\delta)}{X} - \frac{Q_{12} + V_1^2 B_c}{X} \quad (3.32)$$

que es el coeficiente de sensibilidad que indica la variación del flujo de potencia reactiva frente al cambio en la reactancia de la línea. La carga de la línea debe ser lo más elevada posible para poder aplicar el método de reducción residual descrito.

Un método similar al anterior es el propuesto en [73] para la estimación de tomas de transformadores. Se ejecuta fuera de la rutina de estimación de estado y utiliza las tensiones medidas y estimadas para generar un nuevo conjunto de tomas de los transformadores.

El modelo del estimador de estado debe incluir los nudos de alta y baja del transformador o solamente el de alta y el procedimiento utilizado es el siguiente:

1. Si el intercambiador de tomas está situado en el lado de baja del transformador y éste se encuentra en el modelo del estimador, entonces:

$$NT = VT \frac{V_{BM}}{V_{BE}} \quad (3.33)$$

siendo NT la nueva toma, VT la antigua, V_{BM} la tensión medida en el lado de baja y V_{BE} la estimada.

2. Si el intercambiador de tomas está situado en el lado de baja del transformador y éste no se encuentra en el modelo del estimador, entonces

$$NT = \frac{V_{BM}}{V_{BC}} \quad (3.34)$$

siendo V_{BC} la tensión calculada en el lado de baja del transformador según se muestra en la Figura 3.2. Dicha tensión se calcula a partir de

la tensión estimada, la toma y los flujos estimados, todos ellos del lado de alta.

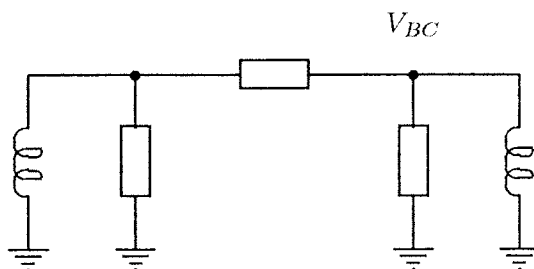


Figura 3.2: Modelo del transformador considerado.

Por lo tanto, para poder aplicar el método es necesario que:

- La medida de la tensión se encuentre en el lado apropiado del transformador.
- En el primer caso, si la toma antigua es significativamente diferente del valor actual, la tensión del lado de baja será detectada como anómala. Sin embargo, incluso en tales casos, la tensión medida se utilizará para calcular una nueva posición de la toma, siempre que la tensión se encuentre dentro de un rango razonablemente predefinido.
- En el segundo caso es necesario que en el lado de alta no existan inyecciones o que éstas sean conocidas de manera que los flujos del lado de alta se puedan estimar.

3.5 Métodos que amplían el vector de estado

Estos métodos incluyen los parámetros erróneos en el vector de estado como si fuesen variables independientes por lo que se calculan tanto las tensiones y desfases de los nudos como los parámetros.

Una vez que se ha ampliado el vector de estado con los parámetros erróneos se puede resolver el sistema de ecuaciones de dos formas diferentes:

- Resolución mediante ecuaciones normales.
- Resolución mediante filtro de Kalman.

Este método puede resolver una o más tomas erróneas de diversos transformadores simultáneamente.

Una variante de este método es el propuesto en [58] pero con la particularidad de que la ampliación del vector de estados se realiza con los incrementos de los flujos de potencia en lugar de con los parámetros erróneos. Por lo tanto lo que se estima son dichos incrementos, procediéndose posteriormente a calcular los parámetros erróneos. Este método se ejecuta en tiempo real.

Similar al método propuesto en [93] pero aplicado a los parámetros de la red es el propuesto en [21], que propone además que la estimación de los parámetros de la red no se realice en tiempo real.

Otra variante del método de [93] es el propuesto en [5, 6] ya que en ellos se estiman todos los elementos de la matriz de admitancia nodal en forma polar y también se realiza la estimación en tiempo real.

3.5.2 Resolución mediante filtro de Kalman

Los métodos de resolución mediante filtro de Kalman permiten utilizar una estimación recursiva en la cual la información a priori sobre el estado estimado se combina con las medidas para actualizar el parámetro estimado.

En el método propuesto en [29] se realiza la estimación de los parámetros de las líneas de transmisión, admitancias y tomas de los transformadores, sesgos de las medidas y desviaciones típicas de los errores de las medidas.

En cada muestra de tiempo k la relación que existe entre las medidas y los estados es:

$$z(k) = h(x(k), k, p) + \nu(k) \quad (3.37)$$

habiéndose hecho depender h explícitamente de k con objeto de reflejar la posibilidad de cambios en la red de un momento a otro y considerando a los parámetros constantes durante todo el periodo de tiempo considerado.

Para estimar el vector de estado hay que minimizar la función objetivo, que en este caso es:

$$J = \sum_{k=1}^m [z(k) - h(x(k), k, p)]^T W [z(k) - h(x(k), k, p)] \quad (3.38)$$

En el caso de que se disponga de una información a priori del vector de parámetros, p_0 , dicha información se puede incorporar al problema:

$$p_0 = p + w \quad (3.39)$$

siendo w un vector de error con media cero y covarianza R_p . Con esto, y siendo $R_p^{-1} = W_p$, la función objetivo se convierte en:

$$J_1 = (p - p_0)^T W_p (p - p_0) + J \quad (3.40)$$

La solución al problema planteado se obtiene mediante la resolución iterativa del siguiente algoritmo:

$$\begin{bmatrix} \hat{x}_k^{i+1}(k) \\ \hat{p}_k^{i+1}(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{x}_k^i(k) \\ \hat{p}_k^i(k) \end{bmatrix} + \Lambda^i(k) \cdot \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \end{bmatrix} \quad (3.41)$$

siendo:

$$\begin{aligned} A_1 &= H_x^T(k) W [z(k) - h(\hat{x}_k^i(k), k, \hat{p}_k^i(k))] \\ A_2 &= H_x^T(k) W [z(k) - h(\hat{x}_k^i(k), k, \hat{p}_k^i(k))] + W_{p,k-1} [\hat{p}_{k-1}^i(k-1) - \hat{p}_k^i(k)] \\ H_x(k) &= \left. \frac{\partial h}{\partial x} \right|_{\hat{x}_k^i(k), \hat{p}_k^i(k)} \\ H_p(k) &= \left. \frac{\partial h}{\partial p} \right|_{\hat{x}_k^i(k), \hat{p}_k^i(k)} \\ \Lambda^i(k) &= \begin{bmatrix} H_x^T(k) W H_x(k) & H_x^T(k) W H_p(k) \\ H_p^T(k) W H_x(k) & W_{p,k-1} + H_p^T(k) W H_p(k) \end{bmatrix}^{-1} \\ &= \begin{bmatrix} \Lambda_{xx}^i(k) & \Lambda_{xp}^i(k) \\ \Lambda_{px}^i(k) & \Lambda_{pp}^i(k) \end{bmatrix} \\ R_{p,k} &= \Lambda_{pp}(k) \end{aligned}$$

\hat{p} el vector de parámetros de red estimados e i el número de la iteración ($i = 1, 2, \dots$)

Este algoritmo, basado en la teoría del filtro de Kalman, es recursivo en el sentido de que en la muestra de tiempo k sólo se considera el vector $z(k)$ junto con los estimados de los parámetros y sus covarianzas, que previamente se han actualizado. Además, no se utiliza en tiempo real de modo que pueda utilizar todas las telemidas almacenadas durante un periodo de tiempo.

Una ampliación del método propuesto es el tratamiento simultáneo de todas las telemidas almacenadas durante un periodo de tiempo para estimar conjuntamente tanto las variables de estado como los parámetros, lo cual se desarrolla en un caso real en [30].

El método propuesto en [86, 87, 88] es recursivo y se basa en el filtro de Kalman para su resolución. Introduce tres importantes variantes con respecto a [29]:

- Localiza el problema en varias pequeñas subredes observables que contienen los parámetros desconocidos.
- Modela los parámetros como procesos de Markov al igual que las variables de estado lo que permite la estimación de parámetros variables con el tiempo.
- La resolución del algoritmo puede realizarse indistintamente en tiempo real o no.

Como consecuencia de dichas variantes:

- Se puede realizar un seguimiento de aquellos parámetros de red que varían continuamente debido a cambios en las condiciones de carga y ambientales.
- La solución no se ve afectada por cambios ni en la red ni en la topología de las medidas.
- La resolución es más rápida al resolver varios problemas pequeños en lugar de uno más grande.
- No presupone la existencia de ramas sin errores que pueden utilizarse como ramas conocidas para la estimación de otras ramas erróneas.
- Es posible la expansión adaptativa de las áreas analizadas de manera que se estimen primero las ramas con mayor redundancia de medidas hasta que se establecen sus parámetros y seguidamente se estiman las que tienen menos redundancia.

El algoritmo de resolución se basa en que la función de densidad de probabilidad de los errores de los parámetros estimados en el tiempo t_i , $f[p(t_i)]$, la de las variables de estado, $f[x(t_i)]$, y la de los errores de las medidas son gaussianas con media cero, de manera que, como se puede deducir de la ecuación (2.9), la función de densidad de probabilidad condicional de $z(t_i)$ sujeta a $x(t_i)$ y $p(t_i)$ es:

$$f[z(t_i)|x(t_i), p(t_i)] = (\sqrt{2\pi})^{-m} |W|^{(1/2)} e^{-\frac{1}{2} [z(t_i) - h(x(t_i), p(t_i))]^T W [z(t_i) - h(x(t_i), p(t_i))]} \quad (3.42)$$

Del teorema de Bayes, la función de densidad de probabilidad conjunta de los parámetros y del estado condicionada a las medidas es proporcional al producto de sus funciones de densidad, de manera que:

$$f[x(t_i), p(t_i)|z(t_1) \dots z(t_i)] = f[z(t_i)|x(t_i), p(t_i)] f[p(t_i)] f[(x(t_i))] \quad (3.43)$$

El estimado de máxima verosimilitud se obtendrá al encontrar el máximo de la función de probabilidad condicional y como dicha función es gaussiana, es equivalente a encontrar el mínimo del exponente de dicha función, es decir:

$$\begin{aligned} \Phi[y(t_i)] &= \frac{1}{2}[z(t_i) - h(x(t_i), p(t_i))]^T W [z(t_i) - h(x(t_i), p(t_i))] \\ &\quad + \frac{1}{2}[y(t_i) - \bar{y}(t_i)]^T W_{xp}[y(t_i) - \bar{y}(t_i)] \end{aligned} \quad (3.44)$$

siendo:

$$y^T(t_i) = [x^T(t_i), p^T(t_i)] \quad (3.45)$$

La condición necesaria para localizar el mínimo es:

$$\frac{\partial \Phi[y(t_i)]}{\partial y(t_i)} = -H[y(t_i)]^T W [z(t_i) - h(y(t_i))] + W_{xp}(t_i)[y(t_i) - \bar{y}(t_i)] = 0 \quad (3.46)$$

donde:

$$H[y(t_i)] = \frac{\partial h[y(t_i)]}{\partial y(t_i)} \quad (3.47)$$

La matriz $W_{xp}(t_i)$ es la inversa de la matriz de covarianzas de $y(t_i)$:

$$W_{xp}(t_i) = \begin{bmatrix} W_x(t_i) & 0 \\ 0 & W_p(t_i) \end{bmatrix} \quad (3.48)$$

Para proceder a la resolución del sistema no lineal al que da lugar se utiliza el método de Newton:

$$\begin{aligned} C \Delta y(t_i) &= H[y(t_i)^k]^T W [z(t_i) - h(y(t_i)^k)] \\ &\quad - W_{xp}(t_i)[y(t_i)^k - \bar{y}(t_i)] \end{aligned} \quad (3.49)$$

$$y(t_i)^{k+1} = y(t_i)^k + \Delta y(t_i) \quad (3.50)$$

donde:

$$C = H[y(t_i)^k]^T W H[y(t_i)^k] + W_{xp}(t_i) + \Upsilon[y(t_i)^k] \quad (3.51)$$

$$\Upsilon[y(t_i)^k] = - \sum_{j=1}^{m_p} \gamma_i[y(t_i)] \frac{\partial^2 h_j[y(t_i)]}{\partial y(t_i)^2} \Big|_{y(t_i)=y(t_i)^k} \quad (3.52)$$

$$\gamma_i[y(t_i)] = \frac{z_j(t_i) - h_j[y(t_i)]}{R_{jj}} \quad (3.53)$$

siendo j un índice de los parámetros y m_p el número de parámetros.

Para efectuar la estimación de los parámetros la red se divide en pequeñas subredes o subsistemas locales y en cada iteración se resuelven las ecuaciones (3.49) - (3.53) mediante factorización triangular de la matriz C . Cada subred es una pequeña porción de la red completa compuesta de unas pocas ramas con el número suficiente de medidas como para asegurar la observabilidad.

El método propuesto es desarrollado como un estimador de parámetros adaptativo, el cual comienza con unas cuantas ramas altamente telemidas. Una vez que se ha establecido la impedancia de dichas ramas, éstas se utilizan para extender la estimación de parámetros a ramas que están menos telemidas. La última de las soluciones contendrá todas las ramas de la red con adecuadas telemidas, excluyendo solamente aquéllas en las que no se haya podido realizar una estimación de parámetro fiable.

Los métodos propuestos en [12, 22, 46] se basan también en la resolución mediante el filtro de Kalman y en la ampliación del vector de estado con aquellos parámetros que han proporcionado un valor elevado en el residuo [12, 46] o en el análisis de sensibilidad del estado [22].

3.6 Discusión

Los métodos que no amplían el vector de estado con los parámetros erróneos se basan para su resolución en el análisis de los residuos ya que postulan que en el espacio de los residuos no se produce el mal condicionamiento que se produce en el espacio de las medidas al mezclar valores grandes y pequeños.

Los valores grandes provienen de los elementos de la submatriz del jacobiano correspondientes a las variables de estado habituales y los pequeños de la parte correspondiente a los parámetros. Esta objeción a los métodos que amplían el vector de estado se puede evitar utilizando doble precisión en los elementos de dicha matriz.

Dentro de los métodos que no amplían el vector de estado, en [76, 77, 94] el método propuesto sólo es válido para la estimación de un único parámetro, en este caso concreto de la toma de un transformador. Asimismo se propone el mismo método para la estimación de más de un parámetro aunque siendo erróneo solamente uno.

En [57] el método propuesto sólo es válido para la estimación de un único error en susceptancias o reactancias. Además, los resultados presentados no son del todo satisfactorios, ya que se admiten como buenos unos resultados

que, partiendo de un error de un 80 % en el parámetro, estiman un valor de éste con un error de un 36 % y con un error en las medidas inferior a un 2 %. Este método es muy similar al propuesto en [76, 77, 94] pero es más complejo ya que se realiza en dos fases en lugar de en una.

Algo también digno de mencionar es que el trabajo presentado en [58] es continuación de [57] y a pesar de ello el autor ha cambiado de un método de resolución que no amplía el vector de estado a otro que sí lo amplía, criticando su anterior trabajo por ser complicado en exceso. Además, los resultados obtenidos en este nuevo trabajo son mucho más aceptables.

El método utilizado en [37, 89] sólo se utiliza para un parámetro erróneo y, para que dicho método sea efectivo, el flujo de potencia reactiva a través del transformador no debe estar muy influenciado por otro transformador cuya toma también esté modificándose con el algoritmo. Es decir, sólo puede estimar una toma simultáneamente, a no ser que estén suficientemente separados los transformadores como para que no exista influencia entre los errores de ambos. Además, los flujos de potencia reactiva medidos en el transformador se suponen que son bastante exactos.

Otro problema se presenta en la identificación del transformador que tiene el error. Cuando varios transformadores están próximos unos de otros y numerosas medidas están afectadas por el transformador que tiene el error, los mayores residuos pueden corresponder a otro transformador, por lo que al proceder a corregir la toma de un transformador que la tiene correcta se produce una degradación de la exactitud de la estimación.

En [89] se detectaron una serie de problemas en la convergencia del método propuesto en [37] y que se subsanaron cuando se procedió a la aplicación de dicho algoritmo sobre un estimador real. Dichos problemas se presentaron cuando los valores de flujos de reactiva medido y calculado eran similares y cuando se producían grandes cambios en los flujos de reactiva calculados como resultado de pequeños cambios en las tomas del transformador.

La efectividad del método propuesto en [73] depende en gran medida de la exactitud de las medidas de tensión, además de necesitar unas determinadas condiciones tal y como se ha expuesto en el Apartado 3.4 al describir el método. Además, sólo es válido para la estimación de un parámetro erróneo.

Dentro de los métodos que amplían el vector de estado, si en el propuesto en [93] se amplía el vector de medidas con otras asociadas a las tomas de los transformadores, tal y como se propone, hay que aumentar también la matriz de covarianzas con las inversas de las varianzas de dichas medidas, con la consiguiente incertidumbre de conocer su valor que ello implica.

El método propuesto en [58] no es válido para dispositivos *shunt* y propone que en las sucesivas estimaciones de parámetros se utilicen los parámetros estimados previamente si no se han producido cambios en la topología de la red.

Al igual que podía ocurrir en [57, 76, 77, 94], en [58] pueden existir problemas de observabilidad debido a la utilización de una única muestra para proceder a la estimación de los parámetros.

De todos modos, en el caso extremo de que el sistema sea crítico antes de estimar el parámetro, éste no podrá ser estimado, y ello independientemente del método que se quiera utilizar.

El método propuesto en [5, 6] es muy laborioso en cuanto que procede a la estimación de todos los elementos de la matriz de admitancias, tanto su módulo como su argumento. Además, para calcular el verdadero valor de una rama, que es lo que realmente interesa en la estimación de los parámetros de la red, una vez que se han calculado todos los elementos de la matriz de admitancias se debe calcular el valor de la rama. Por último, los resultados se obtienen introduciendo una desviación típica de un 1 % en todas las telemidas, tal y como se indicó en el Apartado 2.2, pero sin introducir ningún error en los parámetros de las líneas y a pesar de lo cual se obtienen parámetros estimados con errores de hasta un 10 %, lo cual es excesivo.

En el método propuesto en [29], si se incluye información a priori sobre los parámetros se evitarán los problemas de posibles singularidades de la matriz Λ definida en el Apartado 3.5.2. Es decir, si p_0 es la información a priori que se conoce de p , todos los parámetros que se estimen serán observables. Si las medidas $z(1), \dots, z(m)$, no proporcionan la información necesaria para que el algoritmo estime alguno de los parámetros se mantendrán los valores que se tenían a priori. Por otro lado, si las medidas sí proporcionan dicha información, el estimado tomado a priori no será tenido en cuenta cuando se hayan procesado un número elevado de muestras y será reemplazado por los estimados basados en las medidas. Por lo tanto, si se elige una muestra suficientemente elevada, los parámetros estimados serán insensibles a la información a priori.

En [29] se propone la utilización del método propuesto para la estimación de las tomas de los transformadores, pero dicho método no es bueno para ello por no ejecutarse en tiempo real y considerar constantes a los parámetros, lo que limita la posibilidad de realizar un seguimiento de la estimación de parámetros que son variables con el tiempo como es el caso de las tomas de los transformadores.

El método propuesto en [86, 87, 88], por el hecho de localizar el problema

en varias pequeñas subredes observables que contengan los parámetros desconocidos, evita la posibilidad de que aparezcan potenciales problemas de convergencia cuando se aplica a redes grandes o con varios parámetros inciertos.

De todos los métodos que proponen algoritmos para realizar la estimación de parámetros, ya sean de líneas o de tomas de transformadores, sólo en [5, 30, 46, 57, 58, 76, 77, 94] se menciona el error de las medidas, por lo que los resultados presentados en el resto de artículos que tratan dicho problema no tienen una validez completa debido a que el error de las medidas influye notoriamente.

Así, si un parámetro tiene un error de un 10 % con respecto al valor exacto de dicho parámetro y mediante uno de los algoritmos propuestos se obtiene un parámetro estimado con un error de un 2 % respecto al valor exacto, esto no da ninguna información respecto a si el método es bueno o no. Es necesario conocer además el error de las telemidas utilizadas.

Si las telemidas no tienen error, el algoritmo utilizado para obtener el parámetro estimado mediante el que se ha obtenido una diferencia de un 2 % respecto al valor exacto no es bueno, ya que debería obtenerse un valor inferior al 1 %. Sin embargo, si las telemidas tienen un error de un 2 % sí puede considerarse bueno el algoritmo utilizado.

Todo esto siempre que se disponga de una redundancia suficiente, ya que si ésta no lo es, los resultados obtenidos serán peores. Por lo tanto, es necesario conocer el error de las telemidas y la redundancia que se tiene para que los resultados experimentales puedan ser estudiados y comparados en igualdad de condiciones.

Resumiendo, las distintas problemáticas presentadas en los diversos métodos de resolución son:

- Los métodos que resuelven la estimación de parámetros en el espacio de las medidas pueden tener mal condicionamiento producido al mezclar valores grandes y pequeños, problema que puede ser subsanado utilizando doble precisión en los elementos de la matriz jacobiano o utilizando flujos.
- Los que no amplían el vector de estado y utilizan el análisis de los residuos para su resolución sólo estiman un único parámetro.
- Los que amplían el vector de estado realizando la estimación simultánea de estado y parámetro con un único vector de medidas, incrementan la no linealidad de las ecuaciones y decrementan la redundancia local de las medidas con los posibles problemas de observabilidad que pueden surgir.

Como consecuencia de ello, las medidas conectadas a los transformadores o líneas cuyos parámetros se van a estimar se convierten a menudo en críticas y en este caso la identificación o detección de errores no gaussianos utilizando los tests de residuos convencionales de la estimación de estado no se puede realizar sin emplear alguna información adicional. Lo mismo ocurre con los métodos basados en el análisis de residuos.

En el caso de utilizar varios vectores de medidas correspondientes a momentos diferentes este problema no aparecería, además de evitarse los problemas que se derivan de considerar un valor a priori del parámetro, ya que si el peso que se le da a este valor del parámetro es elevado se obtendrá un valor estimado muy parecido al de partida, por lo que si éste era erróneo se obtendrá un estimado también erróneo. Sin embargo, si el peso es muy pequeño no influye el valor a priori considerado.

- Los métodos que utilizan varios vectores de medidas simultáneamente en la estimación realizan un gran esfuerzo computacional si no se utiliza un método de cálculo eficiente y no se seleccionan previamente los parámetros que hay que estimar.

3.7 Identificación de errores topológicos

El modelo de la red está basado en la información estática provista en la inicialización de la base de datos y en la información dinámica recogida por el SCADA. La información que describe la red no cambia desde la ejecución de una estimación de estado a la siguiente, como ocurre con los generadores, líneas, transformadores, etc. La información dinámica la proporciona el SCADA indicando la posición de los interruptores, las medidas analógicas y las tomas de los transformadores. Esta información, tanto estática como dinámica es la que se utiliza para analizar la red.

Si la información estática es incorrecta el modelo será erróneo. Un ejemplo típico de esto es la conexión de una línea a un embarrado. Así, una línea que físicamente está conectada a la barra A pero que se ha representado conectada a la barra B , se encontrará de verdad conectada a la barra B cuando se cierre el acople. Por lo tanto, mientras el acople se encuentre abierto la topología de la red será errónea.

La mayor fuente de errores topológicos es el no conocimiento o conocimiento incorrecto del estado de los interruptores. Esto normalmente ocurre cuando aparece parpadeando la indicación del posicionamiento de los interruptores,

cuando se indica que se encuentra cerrado y abierto al mismo tiempo, cuando se produce un fallo en la transmisión o se queda incomunicada la subestación durante un periodo de tiempo, etc.

También puede ocurrir que se cambie la posición del interruptor manualmente y el operador no actualice esta modificación. Esto mismo puede ocurrir en los seccionadores, los cuales normalmente no se encuentran telemandados y cuya operación se realiza localmente.

Esta indefinición de la posición del interruptor o seccionador es la que obliga a suponer una posición del interruptor. El criterio que se considera en estos casos puede ser el considerar la posición de explotación normal de ese elemento o la posición más reciente en la que se encontraba. Esta suposición se utiliza para la realización de los cálculos pertinentes de la estimación pero no implica, lógicamente, que el estado de la red sea el correcto.

Estos errores topológicos afectan al estimador de estado y esto conduce a:

- Obtención de un vector de estado incorrecto.
- Detección falsa de medidas erróneas.
- Violaciones erróneas de límites.
- Entradas incorrectas en otras funciones de análisis.
- Modelos de red no fiables.

Este problema se ha estudiado desde diversos puntos de vista. Así, en [60] se propone el estudio basándose en el cambio del estado de las ramas sospechosas una después de otra y realizando una estimación de estado en cada caso y si después de invertir el estado de la rama los residuos obtenidos están dentro de un umbral, entonces el estado original se considera falso.

Posteriormente, en [51] se restringe el área del problema ya que se selecciona mediante el número de medidas erróneas detectadas en los nudos adyacentes y se realizan múltiples estimaciones de estado para todas las posibles combinaciones de los interruptores en una o más de las subestaciones sospechosas. La correcta combinación del estado de los interruptores proporcionará el residuo mínimo.

Otros métodos se basan en un reparto de carga local y detectan un error topológico si los índices calculados después del reparto de carga exceden los límites establecidos [7, 24].

La mayoría de los métodos de identificación de errores topológicos se llevan a cabo una vez que se ha realizado la estimación de estado satisfactoriamente

a pesar de existir errores topológicos. En el caso de que la estimación no converja no se tendrá ningún punto de inicio por lo que los métodos dependen enormemente de las condiciones y características de la operación.

Además, los residuos se ven afectados en gran medida por los errores gaussianos y no gaussianos de las medidas analógicas. En algunos casos los errores no gaussianos de las medidas analógicas pueden hacer que el análisis de residuos no sea fiable [64].

Cuando existen errores en el posicionamiento de interruptores en las subestaciones puede ocurrir que el estimador de estado no los identifique y, sin embargo, detectar erróneamente medidas con errores no gaussianos. Por lo tanto, la detección del posicionamiento incorrecto de los interruptores y la detección de los errores topológicos en general no se ha resuelto aún de una manera satisfactoria, ya que se necesitaría un método que fuese rápido, fiable en presencia de ruidos, robusto ante medidas con errores no gaussianos, fácil de desarrollar en los estimadores existentes, independiente de las características de la red y que no se viese afectado por la carga de ésta.

Existen las siguientes condiciones suficientes para la no detectabilidad y no identificabilidad de errores topológicos:

1. Si una rama es irrelevante, un error topológico que afecte a dicha rama no será detectable [101].
2. La configuración errónea de una rama irrelevante no es detectable si todas las medidas relacionadas con ella son críticas o se convierten en críticas como consecuencia de esa configuración errónea [24, 101].
3. Si dos ramas forman un par crítico de ramas, entonces un error topológico que afecte a dichas ramas no es identificable [24].

Entendiéndose que:

- *Elementos de red* son las líneas de transmisión, transformadores, reactivancias y condensadores.
- Un elemento es *irrelevante* cuando no se tiene ninguna medida de él.
- Una medida está *relacionada* con un elemento de la red si se trata de una medida de inyección en uno de los nudos terminales o del flujo de potencia en ese elemento.
- Una rama es una *rama crítica* de una medida en una red observable si al quitarla hace que el resto de la red sea no observable.

- Dos ramas forman un *par crítico de ramas* de una medida en una red observable si al quitarlas hacen que el resto de la red sea no observable, mientras que si sólo se quita una la red sigue siendo observable.

Como se ha dicho, las tres condiciones dadas son suficientes para la no detectabilidad y no identificabilidad. Para la detectabilidad sólo se han deducido condiciones suficientes en casos muy particulares [24], mientras que las condiciones necesarias y suficientes para la detectabilidad y/o identificabilidad no se han podido deducir aún.

Dos de los más recientes trabajos publicados en el área de identificación de errores topológicos son [4, 85].

En [85] se propone un algoritmo que determine un índice de correlación entre las medidas y los elementos sospechosos. Éste estará incluido dentro de una estrategia general basada en las siguientes etapas:

1. Pruebas de validación realizada en la etapa de prefiltrado.
2. Pruebas realizadas durante la estimación.
3. Procesamiento a posteriori que utilice la información obtenida en las etapas anteriores.

Aunque en muchos casos los errores topológicos se pueden detectar e identificar con los datos que se tienen en la etapa de prefiltrado, existen situaciones dudosas que precisan de unos algoritmos más elaborados que se ejecutarán en la segunda etapa. Uno de estos algoritmos es el que se presenta en [85] y con él se pretende confirmar la presencia de una mala configuración que se hubiera detectado durante la primera etapa o resolver algún caso de duda que se hubiese presentado.

El método propuesto trata de cuantificar la correlación existente entre los valores identificados como medidas con errores no gaussianos, y que en dicho artículo se denominan *medidas sintomáticas*, y las medidas que, en unas determinadas condiciones de operación, se esperan que sean las más afectadas de los posibles errores topológicos y que se denominan *medidas sensibles*. Estas medidas se determinan a través de un análisis de sensibilidad de los residuos con respecto a los flujos de los elementos de red.

El modelo del sistema que relaciona las medidas con los estados que se van a estimar, de acuerdo con (2.7), es

$$z = h(x) + \nu \quad (3.54)$$

Si $h_a(x)$ denota el vector de funciones no lineales del sistema actual en su punto de operación, $h(x)$ el sistema configurado y $\Delta h(x)$ el vector que contiene los errores, entonces:

$$h_a(x) = h(x) + \Delta h(x) \quad (3.55)$$

En el caso de que el elemento que contenga el error sea irrelevante, $\Delta h(x) = 0$ y por lo tanto $h_a(x) = h(x)$.

Considerando (3.54) con las medidas y modelo del actual punto de operación se tiene:

$$z = h(x) + \nu' \quad (3.56)$$

siendo

$$\nu' = \Delta h(x) + \nu \quad (3.57)$$

el error de las medidas cuando existe una configuración errónea.

Este error afecta al vector de residuos de las medidas r , ya definido en el Apartado 2.5.2, que viene determinado por la matriz de sensibilidad residual S_r de manera que:

$$r = S_r \nu' \quad (3.58)$$

El vector de funciones no lineales que contiene los errores $\Delta h(x)$ se puede reescribir, según se describe en [101], como:

$$\Delta h(x) = Lf(x) \quad (3.59)$$

donde $f(x)$ es el vector de flujos de potencia en los elementos de la red y L se define, suponiendo que l_j conecta los nudos h y k , de la siguiente manera:

- Si la i –ésima medida incluye el flujo desde h a k , entonces el elemento (i, j) –ésimo de la matriz L vale 1.
- Si incluye el flujo desde k a h , entonces vale -1 .
- 0 en los demás casos.

Por lo tanto la ecuación (3.58) se puede escribir como:

$$r = S_r Lf(x) \quad (3.60)$$

Y en función de los residuos normalizados:

$$r_N = Sf(x) \quad (3.61)$$

donde S es la matriz de sensibilidad de los residuos normalizados con respecto a los flujos de los elementos:

$$S = [\text{diag}(P_z)]^{-1/2} S_r L = [\text{diag}(P_z)]^{-1/2} (L - H G^{-1} H^T W L) \quad (3.62)$$

y P_z es la matriz de covarianzas residual, ya definida en (2.50):

$$P_z = R - H G^{-1} H^T \quad (3.63)$$

La ecuación (3.61) indica qué residuos son los más afectados por una configuración errónea del sistema. Así, por ejemplo, si existe un error en la configuración del elemento $i - j$ y si $s_{(i-j)}$ es la columna de la matriz S que multiplica el flujo de dicho elemento, entonces los residuos correspondientes a las entradas de $s_{(i-j)}$ que presentan los valores más elevados son los principales candidatos a ser los elementos de red con errores en su configuración.

El método propuesto en [85] se llevará a cabo cuando se detecte alguna anomalía al haber ejecutado las rutinas de detección de errores no gaussianos. Esas medidas detectadas como consecuencia de alguna anomalía son los datos de entrada al método propuesto y constituyen las medidas sintomáticas. El conjunto formado por estas medidas se llamará STM .

Teóricamente, cualquiera de las telemedidas recibidas son susceptibles de ser afectadas por tener un error topológico, sin embargo, realmente sólo un subconjunto de dichas medidas son las que pueden tener errores. Por lo tanto, se definirá $SST_{(i-j)}$ como el conjunto de medidas sensibles a errores en la configuración del elemento $i - j$ y contiene las medidas correspondientes a los $\rho_{(i-j)}$ elementos mayores de la columna $s_{(i-j)}$ de la matriz S , siendo $\rho_{(i-j)}$ un entero positivo. Es decir, suponiendo que se está investigando un error en la configuración de la rama $i - j$, los elementos de la columna $s_{(i-j)}$ se ordenarán de mayor a menor y sus $\rho_{(i-j)}$ elementos mayores son los que formarán el conjunto $SST_{(i-j)}$.

El tamaño del conjunto $SST_{(i-j)}$ vendrá determinado por $\rho_{(i-j)}$, que es igual al número de medidas relacionadas con la rama $i - j$.

Hay que destacar el hecho de que a pesar de que el número de elementos del conjunto $SST_{(i-j)}$ sea igual al número de medidas relacionadas con la rama $i - j$ esto no significa que sus componentes sean las medidas definidas como relacionadas. De hecho, los elementos de $SST_{(i-j)}$ son las $\rho_{(i-j)}$ medidas más sensibles a la configuración errónea de la rama $i - j$ según se ha determinado de los elementos de valores más grandes de la columna $s_{(i-j)}$. Por lo tanto, los elementos de $SST_{(i-j)}$ son las medidas que posiblemente se identifiquen como

medidas erróneas mientras que el elemento $i - j$ no se configure correctamente y por ello, si se determina la intersección del conjunto $SST_{(i-j)}$ con el de las medidas sintomáticas STM , se obtendrá una medida de cómo un error topológico que afecte a la rama $i - j$ es la causa real de la anomalía.

Con objeto de cuantificar el grado de correlación existente entre los conjuntos de medidas sensibles y sintomáticas se define el *índice de correlación* $e_{(i-j)}$ como:

$$e_{(i-j)} = \frac{|STM \cap SST_{(i-j)}|}{\rho_{(i-j)}} \quad (3.64)$$

donde la barra vertical del numerador indica el número de elementos del conjunto indicado.

Este índice varía entre 0 y 1. Así, un valor próximo a 1 indica que existe una fuerte relación entre los síntomas de la anomalía y la configuración errónea del elemento $i - j$. Por otro lado, un valor cercano a 0 indica que una configuración errónea no es la causa de dicha anomalía.

El autor de este método reconoce que existen situaciones dudosas como es el caso de que existan varias medidas analógicas erróneas y que coincidan con los síntomas de un error topológico. Estos casos requerirán alguna estimación posterior que permita identificar la causa real del problema. Estas estimaciones posteriores se pueden realizar de una manera metódica según [70].

Asimismo, y con objeto de que existan unas condiciones favorables para la identificación de los errores topológicos, es necesario que:

- Ninguna rama de la red sea irrelevante.
- El sistema de medidas no presente medidas críticas [24, 84].
- El sistema de medidas no presente conjuntos críticos [84].

Como resumen, el método propuesto en [85] se basa en el siguiente algoritmo:

1. Realizar la estimación de estado y aplicar un test de detección de medidas erróneas para comprobar si se ha producido alguna anomalía.
2. Si el test de detección resulta negativo, parar el algoritmo.
3. Realizar la lista de elementos de red relacionados con medidas en el conjunto STM .
4. Determinar los correspondientes conjuntos de medidas sensibles $SST_{(i-j)}$.

5. Calcular el índice de correlación $e_{(i-j)}$.
6. Etapa de procesamiento posterior: Utilizar el índice $e_{(i-j)}$ con la información adicional de la que se disponga con objeto de decidir si la anomalía es debida a una configuración errónea de alguno de los elementos sospechosos.
 - Si la decisión es positiva, cambiar el estado de la rama identificada y regresar al paso 1.
 - En caso contrario, deducir que la anomalía es debida a la presencia de medidas analógicas erróneas.

Otro de los últimos trabajos publicados en el área de la identificación de errores topológicos, como ya se ha mencionado anteriormente, es [4]. En él se describe qué errores del estado de los interruptores se pueden detectar e identificar en presencia de medidas analógicas erróneas utilizando técnicas de estimación de estado de mínimos valores absolutos y aplicando una estimación en dos etapas tal y como se describe en [71].

Una subestación se puede modelar como un único nudo o como varios dependiendo de la configuración actual y del estado en que se encuentren los interruptores de la subestación. El modelo del sistema que relaciona las medidas con los estados que se van a estimar es (2.7), que linealizado en torno al punto de operación x_0 es:

$$\Delta z = H \Delta x + \nu \quad (3.65)$$

donde

$$\Delta z = z - h(x_0) \quad (3.66)$$

$$H = \left. \frac{\delta h}{\delta x} \right|_{x=x_0} \quad (3.67)$$

$$\Delta x = x - x_0 \quad (3.68)$$

El estimador de mínimos valores absolutos se obtiene minimizando la siguiente función objetivo:

$$J(x) = \sum_{i=1}^m w_i |z_i - h_i(x)| \quad (3.69)$$

Esta función objetivo se puede minimizar iterativamente resolviendo en cada iteración k el siguiente problema de programación lineal:

$$\begin{aligned} \text{minimizar } J(x) &= \sum_{i=1}^m w_i(u_i + v_i) \\ \text{sujeto a: } \Delta z^k &= H(x^k)\Delta x^k + u - v \end{aligned} \quad (3.70)$$

donde

$$\Delta z^k = z - h(x^k) \quad (3.71)$$

$$H(x^k) = \left. \frac{\delta h}{\delta x} \right|_{x=x^k} \quad (3.72)$$

y siendo w_i el peso asignado a la medida i -ésima y u y v variables no negativas tales que $(u - v)$ representa los residuos de las medidas.

Si una subestación se modela en detalle, representando individualmente los interruptores y su configuración, entonces las ecuaciones (3.65) se pueden reescribir como:

$$\Delta z = H\Delta x + Mf + \nu \quad (3.73)$$

donde M es una matriz de tamaño $(m \times l)$ que representa la matriz de incidencia de las medidas en los interruptores, l es el número de interruptores y f es el vector de tamaño $(l \times 1)$ que representa los flujos a través de los interruptores.

La matriz M se define de la siguiente manera:

- Si la medida i es de inyección:
 1. Si incide en el nudo j entonces $M_{ij} = 1$.
 2. Si parte del nudo j entonces $M_{ij} = -1$.
 3. En cualquier otro caso $M_{ij} = 0$.
- Si la medida i es de flujo:
 1. Si incide en el nudo j entonces $M_{ij} = -1$.
 2. Si parte del nudo j entonces $M_{ij} = 1$.
 3. En cualquier otro caso $M_{ij} = 0$.

Por lo tanto, $f = 0$ cuando todos los interruptores se encuentran abiertos y (3.73) es idéntica a (3.65). Con objeto de simplificar la notación se define el vector Δy como:

$$\Delta y = [\Delta x^T f^T]^T \quad (3.74)$$

que es el vector de estado aumentado por los flujos de potencia de los interruptores.

Introduciendo estas modificaciones, las ecuaciones (3.70) quedan:

$$\begin{aligned} \text{minimizar } J(x) &= \sum_{i=1}^m w_i(u_i + v_i) \\ \text{sujeto a: } \Delta z &= [H|M]\Delta y + u - v \end{aligned} \quad (3.75)$$

Los elementos de Δy serán observables dependiendo del rango de la matriz $[H|M]$. Los estados no observables se podrán identificar mediante el estimador de mínimos valores absolutos durante la fase inicial de la resolución.

Dicha estimación se realiza resolviendo iterativamente el problema de programación lineal de (3.75). En la primera iteración de la estimación de estado la solución se obtiene en dos fases, mientras que en las posteriores la primera fase no se realiza.

El objeto de la primera fase es obtener una base que sirva de inicio para la segunda fase y debido a la naturaleza de la formulación de la estimación de mínimos valores absolutos, el correspondiente problema de programación lineal tiene disponible una posible solución básica al inicio de esta primera fase en la cual las variables de estado son iguales a cero y el resto son iguales a sus correspondientes valores del vector de términos independientes. Así, la base inicial que se elige es una matriz diagonal B cuyos valores son:

- Para $\Delta z_i \geq 0$, $B_{ii} = -1$.
- Para $\Delta z_i < 0$, $B_{ii} = 1$.

El algoritmo utilizado se basa en [16] y las variables no básicas no son observables y permanecen en este estado durante la segunda fase hasta la convergencia del estimador.

La segunda fase comienza utilizando la base obtenida en la primera y mientras que en ésta el número de iteraciones es igual al número de variables de estado (tensiones en los nudos y flujos en los interruptores), en aquélla depende del número de medidas. El método de resolución del estimador de estado de mínimos valores absolutos desarrollado en dos fases se basa en [3].

Aun cuando las medidas de los flujos de los interruptores no se tienen disponibles habitualmente, sí se pueden utilizar como pseudomedidas el flujo cero de los interruptores que se encuentran abiertos. A pesar de esto, puede ocurrir que los flujos de algunos de ellos sigan siendo no observables, lo que implicaría que con las medidas de las que se dispone no es posible identificar el

estado de todos los interruptores de la subestación. En este caso, los resultados obtenidos en la primera fase indicarán los interruptores cuyos estados no se podrán identificar.

Como se indicó anteriormente, la identificación del estado de los interruptores se realiza en dos etapas:

- Primera etapa:

1. Ejecutar el estimador de mínimos valores absolutos utilizando el modelo formado por el procesador de topología basado en la topología o suponiendo los estados de los interruptores del sistema.
2. Calcular los residuos normalizados utilizando la matriz de covarianzas de los residuos de las medidas desarrollado en [2]. Los residuos normalizados se calcularán solamente para las medidas que son rechazadas por el estimador.
3. Identificar las medidas sospechosas con residuos normalizados significativos (por ejemplo, con valores superiores a 3). Si no hay ninguna, se decidirá que no existen errores topológicos ni en las medidas analógicas. En caso contrario regresar al paso 2.

- Segunda etapa:

1. Identificar los nudos en los que las medidas sospechosas de la primera etapa inciden un mayor número de veces. Introducir un modelo detallado de la subestación, utilizando ramas de impedancia cero para representar los interruptores de la subestación correspondiente. Utilizar todas las medidas de la subestación, incluyendo los flujos de potencia en los interruptores, los cuales no han sido utilizados explícitamente en la primera etapa. Por ejemplo, la información del flujo a través de un interruptor que conecte dos nudos de una misma subestación puede perderse si ambos nudos se modelan como uno único.
2. Ejecutar el estimador de mínimos valores absolutos para todo el sistema. Repetir el test de residuos normalizados. Señalar las medidas que se detecten en el test y declarar esos errores como errores de medidas analógicas. La topología correcta del sistema se determinará teniendo en cuenta los estados estimados de los interruptores basándose en los flujos normalizados a través de ellos.

3.8 Resumen

En este capítulo se ha analizado la problemática que presentan los errores en los parámetros pudiendo ser éstos tanto de líneas como de tomas de transformadores.

Primeramente se ha expuesto la forma en la que los diferentes autores identifican los errores de los parámetros (Apartado 3.2), basándose dichos métodos en el cálculo de los residuos principalmente.

Se han expuesto las clasificaciones que sobre los métodos de estimación de parámetros se han realizado hasta la fecha presentándose una nueva que resalta la diferencia más significativa de cada uno de los métodos, como es la ampliación o no del vector de estado mediante la introducción de los parámetros erróneos como variables adicionales (Sección 3.3):

- Métodos que no amplían el vector de estado:
 - Utilización de residuos.
- Métodos que amplían el vector de estado:
 - Resolución mediante ecuaciones normales.
 - Resolución mediante filtro de Kalman.

En el Apartado 3.4 se han presentado los métodos que no amplían el vector de estado. Estos se basan para su resolución en el análisis de los residuos.

Seguidamente, en el Epígrafe 3.5 se han analizado los que amplían el vector de estado con los parámetros erróneos como si fuesen variables independientes, por lo que se calculan tanto las tensiones y desfases de los diferentes nudos como los parámetros. Estos métodos resuelven el sistema de ecuaciones planteado de dos formas diferentes como se acaba de indicar:

- Mediante ecuaciones normales (Apartado 3.5.1).
- Mediante filtro de Kalman (Apartado 3.5.2).

A continuación se han discutido los diferentes métodos propuestos en los artículos que tratan este tema (Sección 3.6), resumiéndose las problemáticas presentadas en los diversos métodos de resolución.

Por último, en el Apartado 3.7 se ha estudiado la identificación de errores topológicos como uno de los aspectos relacionados con la estimación de parámetros.

Capítulo 4

Influencia de Errores en los Parámetros sobre la Estimación

4.1 Introducción

En el Capítulo 3 se ha revisado el estado del arte de la estimación de parámetros haciéndose referencia a los posibles errores existentes, sus causas, sus consecuencias, así como a los distintos métodos existentes para su resolución.

En la literatura existente al respecto se hace mención de la importancia que tiene el estimar dichos parámetros con objeto de evitar la degradación que se produce en la estimación de las variables de estado. Sin embargo, solamente en [86, 88] se realiza un pequeño estudio sobre el efecto que los errores en dichos parámetros y en las medidas ejercen sobre la solución del estimador de estado.

El análisis realizado se limita a representar una gráfica en la que se muestra el efecto producido, por un lado, por los errores en los parámetros y, por otro, por los errores en las medidas, sobre la función objetivo de la estimación de estado. Dicha gráfica se obtuvo aplicando un error constante a todos los parámetros de las ramas o a todas las medidas independientemente.

Los resultados obtenidos demuestran que, dependiendo de dicho error, los errores en los parámetros pueden producir un impacto sobre la estimación de estado similar o superior al de los errores en las medidas. Por ello, los errores en los parámetros no detectados pueden afectar gravemente a la exactitud de las aplicaciones de seguridad y optimización de la red.

Asimismo, en [90] se realiza un análisis de sensibilidad para considerar los efectos de ciertos errores sobre la estimación de estado. En dicho estudio sólo se realiza un único ensayo sobre tres líneas distintas simultáneamente,

obteniéndose resultados respecto a las tensiones, sus desviaciones típicas y los flujos de potencia cuando se produce un error en:

- La capacitancia, la inductancia o la resistencia de esas tres líneas concretas.
- La varianza de los errores de las medidas.
- Las tomas de los transformadores.

El resultado más importante que se obtiene es que la inductancia de la línea es la que introduce los mayores errores sobre los flujos de potencia, aunque dichos resultados no pueden considerarse muy significativos debido al pequeño tamaño de la muestra que ha servido de estudio.

Por lo tanto, y ya que en la literatura que trata la estimación de parámetros no se ha realizado un estudio exhaustivo de la influencia de los errores en los parámetros sobre la estimación de estado, se va a proceder en este capítulo a analizar dicha influencia de una manera sistemática, presentándose previamente en la siguiente sección el entorno de simulación utilizado.

4.2 Entorno de simulación

El estudio que se va a presentar en los siguientes apartados va a realizarse sobre la red de catorce nudos y veinte líneas IEEE-14 [96] representada en la Figura 4.1. Para considerar diversos estados de la red a lo largo de un día se han tomado veinticuatro muestras, equivalentes a las horas de un día, de tensiones y desfases en cada uno de los nudos [78] y se han intercalado setenta y cuatro nuevas muestras entre dichas horas.

Con esas mil ochocientas muestras de tensiones y desfases en cada uno de los nudos, que equivalen a haber obtenido cada una de las muestras cada cuarenta y ocho segundos, se han generado sus correspondientes flujos e inyecciones tanto de potencia activa como de reactiva a partir de las ecuaciones [14]:

$$P_i = \sum_{j=1}^N V_i V_j (G_{ij} \cos(\theta_{ij}) + B_{ij} \sin(\theta_{ij})) \quad (4.1)$$

$$Q_i = \sum_{j=1}^N V_i V_j (G_{ij} \sin(\theta_{ij}) - B_{ij} \cos(\theta_{ij})) \quad (4.2)$$

$$P_{ij} = V_i V_j (G_{ij} \cos(\theta_{ij}) + B_{ij} \sin(\theta_{ij})) - G_{ij} V_i^2 \quad (4.3)$$

$$Q_{ij} = V_i V_j (G_{ij} \sin(\theta_{ij}) - B_{ij} \cos(\theta_{ij})) + V_i^2 (B_{ij} - B_{ij}^c) \quad (4.4)$$

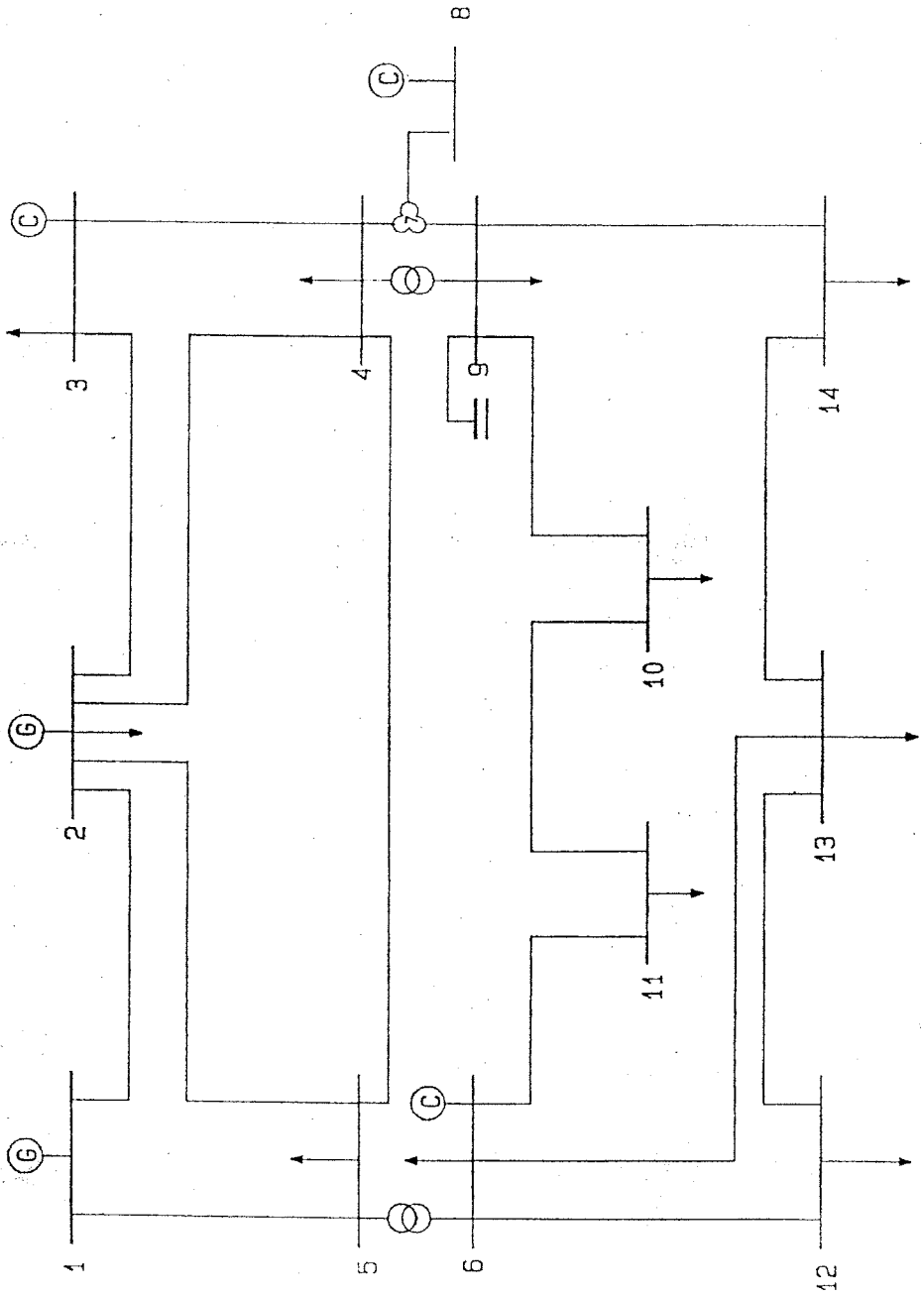


Figura 4.1: Red IEEE-14.

siendo:

- V_i, V_j los módulos de las tensiones en los nudos i y j .
- θ_{ij} el desfase entre los nudos i y j .
- $G_{ij} + B_{ij}$ el elemento (i, j) de la matriz de admitancias de nudos.
- B_{ij}^c la admitancia *shunt* del modelo en π de la línea que une i con j .

De este modo se han obtenido los distintos estados exactos por los que pasa la red a lo largo de un día.

Las medidas se han considerado con la máxima redundancia, es decir:

- En cada nudo se tienen las medidas tanto de las tensiones como de las inyecciones de potencia activa y reactiva.
- En cada rama se tiene información de los flujos de potencia, tanto activa como reactiva, en cada extremo.

Por lo tanto, y ya que la red es de catorce nudos, de cada estado se poseen ciento veintidós medidas y, a no ser que se especifique lo contrario, se considerará que los estados tienen el conjunto de medidas completo, es decir, constan de las ciento veintidós medidas indicadas. Dichos estados son los estados exactos por los que atraviesa la red pero que en la realidad nunca son conocidos debido a los diferentes errores que se introducen en las telemedidas. Por ello, para realizar la simulación, a los estados exactos se les ha sumado un error gaussiano obtenido con un generador de números aleatorios a partir de la desviación típica σ de cada medida.

Como se dijo en el Epígrafe 2.2, la clase del aparato de medida es el parámetro que más influye en los errores de las medidas y, según su definición, es el error máximo con respecto a la señal de plena carga, es decir, de su fondo de escala. Por ello, el valor de σ que se ha considerado es función del fondo de escala, habiéndose considerado:

- Para las medidas de tensión: $\sigma = 0.1 * \gamma * FE$.
- Para las medidas de potencia: $\sigma = \gamma * FE$.

donde γ es la clase del dispositivo de medida y FE es el fondo de escala de dicho aparato. Para los dispositivos medidores de tensión se ha considerado $FE = 1$.

Los fondos de escala considerados para cada aparato de medida son distintos y dependientes del máximo valor esperado en cada punto de medida. Además, se han agrupado dichos valores en torno a varios de ellos para que no sea mucha la diversidad de valores utilizados. Así, los fondos de escala considerados para las inyecciones en los nudos y los flujos en las ramas, en por unidad y sobre una base de 100 MVA, son los indicados en el Apéndice D. Los valores de flujos de potencia son válidos para ambos extremos de la línea.

Por último, y con objeto de que los resultados que se obtengan de los estudios que se van a realizar sean estadísticamente significativos, cada una de las pruebas representa el valor medio de la ejecución de sesenta estimaciones de estado, usándose una línea distinta cada vez. Sus medidas se han obtenido de los diferentes estados de un día completo y que previamente se han generado tal y como se ha descrito.

El hecho de que se hayan utilizado sesenta estados, y teniendo en cuenta que la red IEEE-14 consta de veinte ramas, significa que cada línea ha sido ensayada tres veces.

Con objeto de caracterizar los resultados obtenidos, se han utilizado tanto la clase de los dispositivos de medida como el error relativo medio de las medidas afectadas en las sesenta estimaciones. Asimismo, el índice comparativo adoptado ha sido el error relativo medio de las medidas estimadas, por lo que la influencia de los errores en los parámetros puede ser visualizada fácilmente.

4.3 **Carácter local del efecto de los errores en los parámetros**

Con objeto de realizar el estudio sistemático de la influencia de los errores en los parámetros se va a comenzar con el análisis de algo que parece obvio pero que no ha sido estudiado previamente. Esto es la influencia local de los errores de los parámetros en la red.

Para ello, al referirse a la influencia sobre las *medidas de toda la red* se van a considerar todas las medidas disponibles, es decir, todas las que se han utilizado en la estimación de estado. Sin embargo, al referirse a las *medidas adyacentes*, aunque todas las medidas de la red contengan errores, el análisis de los efectos será local, es decir, solamente se analizarán las medidas directamente relacionadas con la línea problemática (los flujos de potencia de la propia línea errónea y las tensiones e inyecciones de sus nudos adyacentes).

En la Figura 4.2 se representa la influencia del error conjunto de la sus-

ceptancia y la conductancia cuando sólo existe una línea errónea. Con trazo discontinuo aparece la influencia sobre las medidas de toda la red y en trazo continuo sobre las medidas adyacentes a la rama.

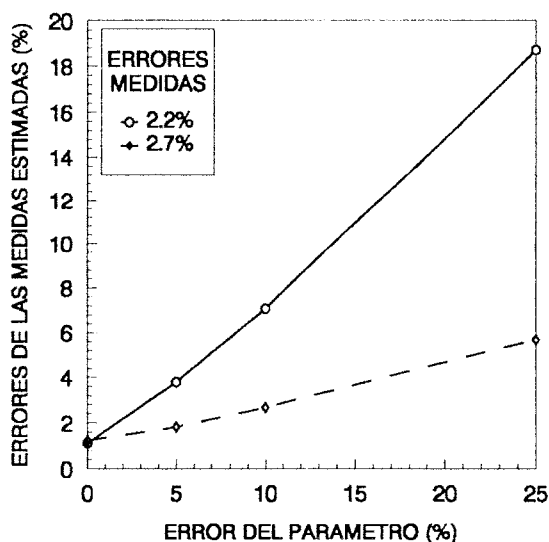


Figura 4.2: Influencia del error conjunto en la susceptancia y la conductancia de una línea sobre las medidas: (a): De toda la red (trazo discontinuo); (b): Adyacentes (trazo continuo).

Hay que destacar de dichas curvas que a pesar del alto grado de redundancia que se tiene, redundancia completa, y a pesar de que solamente un parámetro se ha considerado erróneo, es notable el deterioro producido a medida que el error en el parámetro crece. También es necesario hacer notar que el hecho de que los valores de los errores en las medidas cuando se considera toda la red y cuando sólo se consideran las medidas adyacentes sean distintos, es debido a que las medidas adyacentes son un subconjunto de las de toda la red.

En la Figura 4.3 se representa el cociente entre el error de las medidas estimadas cuando existe un error en la susceptancia de una línea y el mismo cuando no existe error en dicha línea. Todo ello a distintas *distancias* de la medida errónea y cuando los dispositivos de medida son de clase 1.

Se entiende por medidas a *distancia 1* las adyacentes a la rama que contiene el parámetro erróneo, es decir, las tensiones e inyecciones de los nudos extremos de la rama y los flujos de la propia rama. Por medidas a *distancia 2*, las anexas a las que se encuentran a *distancia 1*, y así sucesivamente.

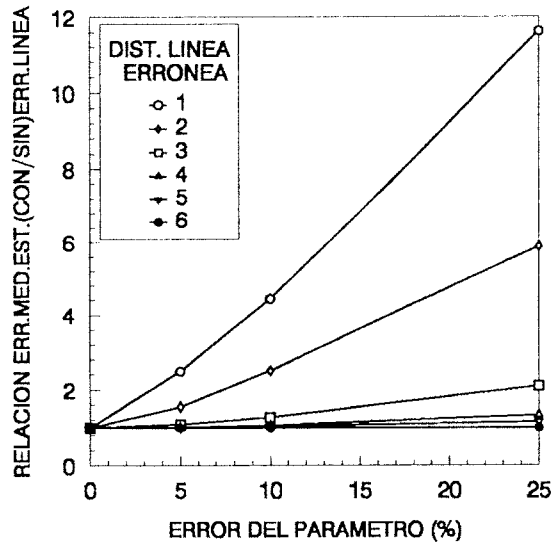


Figura 4.3: Influencia del error de una línea sobre las medidas estimadas a distintas *distancias*: Error de las medidas estimadas con error en una línea / Error de las medidas estimadas sin error en la línea.

En dicha figura se muestra cómo a medida que aumenta la distancia a la línea que contiene el parámetro erróneo dicho cociente tiende a 1, es decir, al comportamiento como si no existiese dicho error, y ello independientemente del error en dicho parámetro.

No hay que olvidar que cada uno de los puntos señalados en cada figura representa el valor medio de la ejecución de sesenta estimaciones de estado con diferentes medidas, todo ello para que los estudios realizados y las conclusiones obtenidas sean estadísticamente significativos.

Por lo tanto, de este apartado podemos concluir que:

- Para parámetros sin errores, que coincide con el eje de ordenadas de la Figura 4.2, el estimador de estado es capaz de reducir el error medio de las medidas por un factor de dos aproximadamente, para la redundancia dada.
- A pesar del alto grado de redundancia que se tiene cuando se utilizan los conjuntos completos de medidas y a pesar de que solamente se ha considerado erróneo un parámetro, se puede apreciar un notable deterioro a medida que el error en el parámetro crece.

- Las curvas que consideran únicamente las medidas relacionadas directamente con la línea problemática tienen una pendiente mucho más pronunciada que las que tienen en cuenta todas las medidas de la red. Es decir, el error en el parámetro tiene mucha mayor influencia.
- Los resultados obtenidos son cualitativamente válidos para cualquier red, permaneciendo similares las curvas que se refieren a las medidas adyacentes y tendiendo a ser más horizontales las que hacen referencia a las medidas de toda la red a medida que ésta crece.
- Los errores de las medidas estimadas cuando existe algún parámetro erróneo tienden a igualarse a los obtenidos cuando no existe dicho error a medida que crece la distancia a la línea errónea, siendo este resultado también válido para cualquier red.

4.4 Análisis del nivel de error en las medidas

Una vez que en el Apartado 4.3 se ha estudiado la importancia que tienen los errores en los parámetros al realizar la estimación de estado, principalmente en los nudos adyacentes al error, y que se ha obtenido la conclusión de que dicha influencia disminuye a medida que aumenta la distancia, en el presente epígrafe se va a estudiar la posible influencia que pueden tener los errores de las telemidas.

Puede ocurrir que la influencia de los errores en los parámetros sea independiente de los errores de las medidas, lo que implicaría que la calidad de las medidas no va a ser decisiva, o que aumente o disminuya dicha influencia dependiendo de las telemidas, lo que implicaría que sí sería decisiva la influencia de dichos errores en las medidas.

Seguidamente se va a analizar dicha influencia. Para ello, se van a considerar niveles de errores producidos por transductores de clase 1, 3 y 5, lo que permitirá cubrir un amplio rango de medidas que son superiores a las que normalmente se encuentran en la vida real. Además, se considera la clase 0, que equivale a medidas sin errores, es decir, medidas exactas. Aunque con la indicación de la clase del aparato de medida sería suficiente para realizar el estudio, se indican también los errores medios de las medidas para una mayor claridad y comprensión de éstas.

Al igual que en la Sección 4.3 y que en el resto del capítulo, cada uno de los puntos representados en las figuras es el valor medio de la ejecución de

sesenta estimaciones de estado diferentes. Además, como de dicha sección se ha concluido que las medidas relacionadas directamente con la línea errónea se ven más afectadas por dicho error, sólo se va a estudiar en este apartado este caso, ya que el comportamiento que se presenta si se consideran para el análisis las medidas de toda la red es similar al que aparece si sólo se considera la influencia sobre las medidas adyacentes, aunque menos pronunciado. Evidentemente, si se considera que todas las medidas de la red tienen errores gaussianos.

En la Figura 4.4 se representa la influencia del error de la susceptancia y la conductancia conjuntamente cuando sólo existe una línea errónea, sobre las medidas adyacentes a dicha línea.

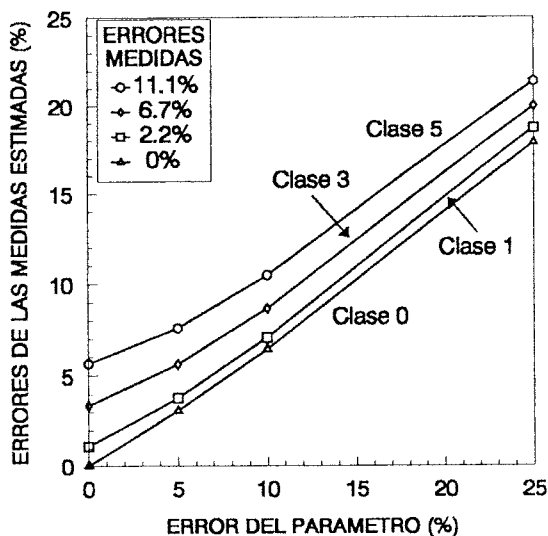


Figura 4.4: Influencia del error conjunto en la susceptancia y la conductancia de una línea sobre las medidas adyacentes para distintas clases.

En dicha figura se puede apreciar un notable deterioro a medida que el error en el parámetro crece, conclusión similar a la obtenida de la Figura 4.2, la cual se obtuvo con telemidas de clase 1. Asimismo se aprecia que cuanto más exactas son las medidas de las que se dispone, mayor es la influencia que tienen los errores en los parámetros.

Esta última conclusión se puede apreciar mejor en la Figura 4.5, en la cual se ha representado la relación existente entre los errores de las medidas estimadas y los errores de las telemidas con objeto de normalizar dichas curvas y todo ello para distintos errores en el parámetro.

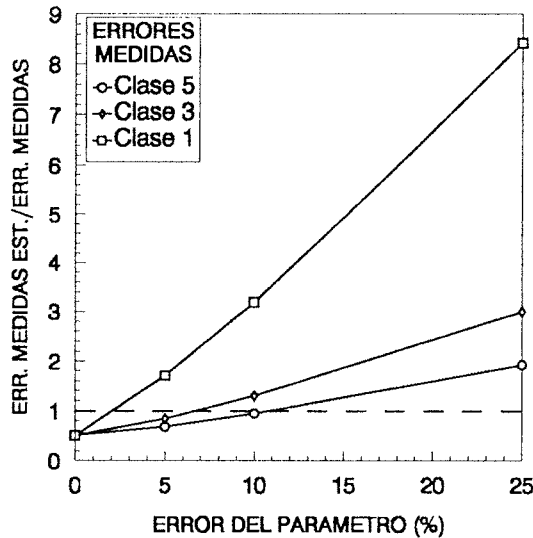


Figura 4.5: Influencia del error de una línea frente a la relación entre los errores de las medidas estimadas y las telemidas (adyacentes).

En ella se puede observar que, para la redundancia dada, cuando las telemidas tienen clase 5, con un error medio en el parámetro de una línea de un 11 % las medidas estimadas tienen el mismo error que las de partida. Para telemidas de clase 3 el valor se reduce a un 7 % y si la clase es 1 se reduce a solamente un 2 %. Es decir, si la clase de las medidas que se poseen es 1 (lo que equivale a un error de un 2.2 % para este caso particular), con un error en un parámetro de tan solo un 2 % se obtiene una estimación de las medidas adyacentes también de un 2.2 %; por lo tanto, si el error del parámetro fuera mayor, se obtendrían unos valores estimados de las medidas peores que los de partida.

Por último, en las Figuras 4.6 y 4.7 se representa el cociente entre el error de las medidas estimadas cuando existe un error en la susceptancia de una línea y el mismo cuando no existe error en dicha línea a *distancias* 1 y 2 de la medida errónea respectivamente.

Del análisis de las figuras se puede concluir que:

- Los errores en los parámetros influyen más cuanto más exactas son las medidas de las que se dispone.
- Las conclusiones son válidas para cualquier red independientemente de

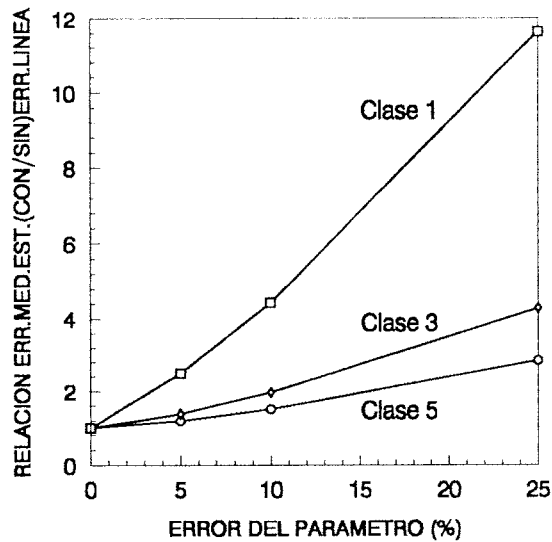


Figura 4.6: Influencia del error de una línea sobre las medidas estimadas a *distancia 1* para distintas clases: Error de las medidas estimadas con error en una línea / Error de las medidas estimadas sin error en la línea.

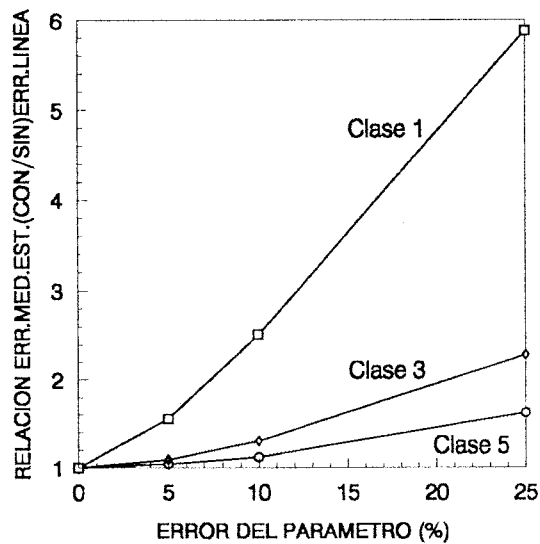


Figura 4.7: Influencia del error de una línea sobre las medidas estimadas a *distancia 2* para distintas clases: Error de las medidas estimadas con error en una línea / Error de las medidas estimadas sin error en la línea.

su tamaño.

4.5 Errores en la conductancia y en la susceptancia

Hasta el momento, en el presente capítulo se han estudiado tanto la localización del efecto de los errores en los parámetros sobre la estimación de estado como la influencia del nivel de error en las medidas, habiéndose observado la notable influencia que tienen ambos. En dichos estudios, cuando se ha analizado el error en el parámetro se ha considerado que tanto la susceptancia como la conductancia eran erróneas, sin hacer distinción entre ambas.

En esta sección se va a analizar cómo influyen los errores en la conductancia y en la susceptancia sobre la estimación independientemente.

Respecto a los errores en la conductancia o en la susceptancia, en la literatura existente de estimación de parámetros se hace referencia a que solamente tiene importancia la susceptancia. Así, en [37, 58] se menciona que es razonable asumir que en la práctica no existe error en la conductancia y un razonamiento similar se realiza en [30], donde se hace referencia a que las pequeñas conductancias y capacitancias *shunt* que suelen tener las líneas producen pocas consecuencias en la estimación de estado.

Sin embargo, respecto a este tema, al igual que ocurría con los anteriores tratados en el presente capítulo, no se ha realizado un estudio que justifique dicho razonamiento.

Teniendo en cuenta que el error del parámetro es mucho más significativo sobre las medidas adyacentes que sobre las medidas de toda la red, tal y como se ha concluido en el Apartado 4.3, en el presente epígrafe sólo se va a analizar este caso, ya que la influencia sobre las medidas de toda la red sería idéntico pero menos pronunciado.

Así, en la Figura 4.8 se muestra la influencia del error en la conductancia y en la susceptancia, independientemente, de una línea sobre las medidas adyacentes cuando se dispone de transductores de clases 1 y 5. Evidentemente, las curvas correspondientes a la clase 1 son las de menores errores en las medidas.

De dicha figura se puede concluir que los errores en la conductancia son menos significativos que los existentes en la susceptancia; es decir, al aumentar el error de la conductancia, el aumento de su influencia sobre las medidas adyacentes es mucho menor que el que se produce cuando aumenta el de la susceptancia.

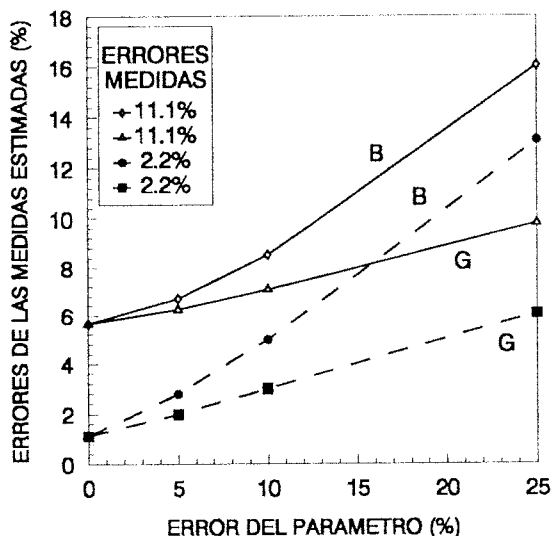


Figura 4.8: Influencia del error en la susceptancia y en la conductancia de una línea sobre las medidas adyacentes.

Además, teniendo en cuenta que los factores que influyen en la conductancia son:

- El efecto pelicular, que es función de la frecuencia.
- La temperatura del conductor, que depende de la disipación del calor de la línea por convección y radiación y es la causa que produce los mayores efectos.

y los que influyen en la susceptancia son:

- La permeabilidad del material del conductor.
- La geometría de la configuración de la línea.

la conclusión obtenida anteriormente de que los errores en la conductancia son menos significativos que los existentes en la susceptancia es de suma importancia, ya que los valores de la conductancia, los cuales están sujetos a perturbaciones periódicas motivadas por cambios en la temperatura, son los errores menos significativos.

Esta importante conclusión va a permitir que a partir de ahora el estudio se pueda centrar en la estimación de las susceptancias erróneas de la red.

4.6 Influencia de los flujos e inyecciones sobre las medidas estimadas

El conjunto de medidas considerado para realizar el estudio del Apartado 4.5 ha sido completo, es decir, con la máxima redundancia. Sin embargo, es interesante conocer si los parámetros afectan por igual cuando se posee un tipo de medidas u otro. Esto puede dar información, cuando se realiza la estimación de estado, de si se están introduciendo graves errores o no debido a los existentes en los parámetros.

Para realizar este análisis se van a comparar los efectos producidos, sobre las medidas adyacentes, por el error en la susceptancia de una línea con dos conjuntos de medidas distintos:

- Tensiones y flujos de potencia.
- Tensiones e inyecciones de potencia.

Se va a estudiar el caso del error en la susceptancia, de acuerdo con la conclusión obtenida en el Epígrafe 4.5, y sobre las medidas adyacentes, ya que, como se observó en la Sección 4.3, el efecto sobre ellas es idéntico al que se produce cuando se analiza la influencia sobre las medidas de toda la red, aunque más pronunciado.

En la Figura 4.9 se muestra la influencia del error producido por la susceptancia errónea de una línea sobre las medidas adyacentes cuando sólo se tiene información de las tensiones y los flujos de potencia como conjunto de medidas y cuando sólo se posee de las tensiones y de las inyecciones de potencia. Al igual que ocurría con la Figura 4.8, los resultados se han obtenido considerando que se dispone de transductores de clases 1 y 5, siendo las curvas correspondientes a la clase 1 las de menores errores en las medidas.

Hay que recordar que, al igual que el resto de curvas, los puntos señalados en la Figura 4.9 representan la media de los resultados obtenidos para sesenta estimaciones de estado distintas, lo que corresponde a haber ensayado cada rama tres veces.

De dicha figura se puede concluir claramente que, cuando se dispone de medidas de flujos de potencia, la influencia del parámetro erróneo es mucho mayor que cuando se dispone de medidas de inyecciones, siendo la influencia en este último caso casi nula. Es decir, los errores de las medidas estimadas son casi independientes de los de los parámetros, al menos cuando un solo

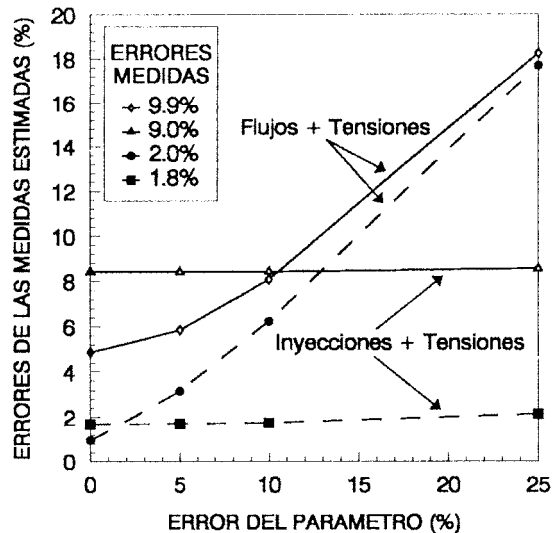


Figura 4.9: Influencia del error en la susceptancia de una línea sobre las medidas adyacentes con diferentes tipos de medidas.

parámetro es erróneo. Esto es debido a la propia estructura de las ecuaciones de las inyecciones ((4.1), (4.2)) y las de los flujos de potencia ((4.3), (4.4)).

4.7 Influencia sobre las medidas estimadas

Con objeto de estudiar si los errores en los parámetros influyen de igual manera en las medidas estimadas, se va a proceder a analizar dicha influencia según el tipo de medida.

Con este fin, y en el caso de que exista redundancia completa con distintos niveles de errores, se van a considerar tres casos:

1. Influencia sobre las medidas de tensión adyacentes cuando todas las medidas son exactas excepto las de tensión.
2. Influencia sobre las medidas adyacentes de inyección de potencia cuando todas las medidas son exactas excepto las de inyección.
3. Influencia sobre las medidas adyacentes de flujo de potencia cuando todas las medidas son exactas excepto las de flujo.

En la Figura 4.10 se ha representado la influencia sobre las medidas de tensión. En ella se presenta el mismo comportamiento que el observado hasta ahora, es decir:

- El deterioro producido sobre las medidas estimadas aumenta a medida que el error en el parámetro crece.
- Los errores de los parámetros tienen mayor influencia sobre las tensiones estimadas a medida que las medidas son más exactas.

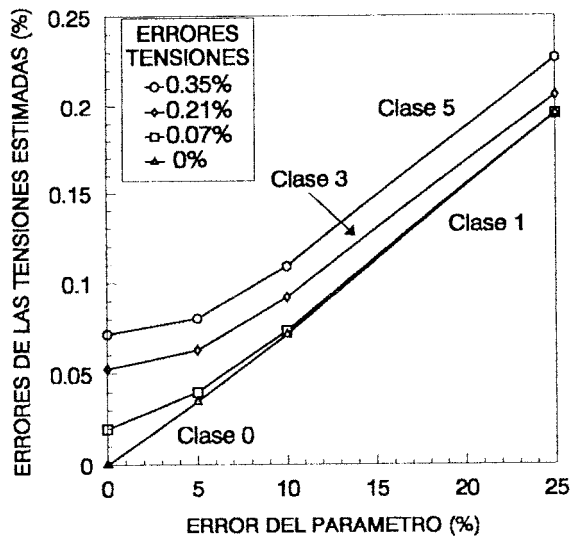


Figura 4.10: Influencia sobre las medidas de tensión adyacentes cuando todas las medidas son exactas excepto las de tensión.

En la Figura 4.11 se muestra la influencia sobre las medidas de inyección, tanto de activa como de reactiva, pudiéndose observar que:

- A medida que el error en el parámetro crece, el deterioro producido sobre las medidas estimadas aumenta.
- A medida que las medidas son más exactas, los errores de los parámetros tienen menor influencia sobre los valores de las inyecciones estimadas.

Por último, en la Figura 4.12 se muestra la influencia sobre los flujos, pudiéndose concluir que:

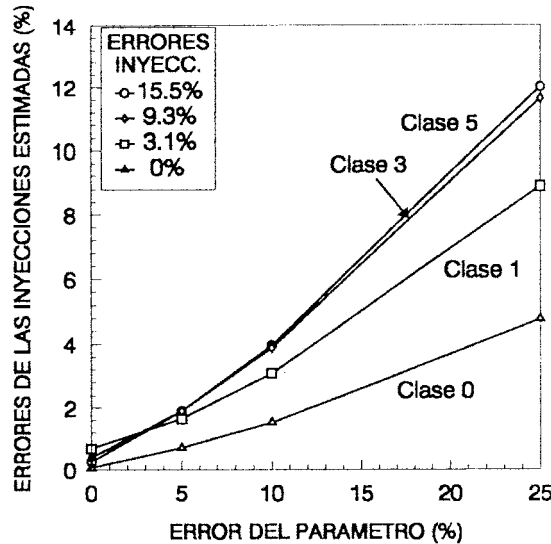


Figura 4.11: Influencia sobre las medidas de inyección adyacentes cuando todas las medidas son exactas excepto las de inyección.

- Al igual que en los casos anteriores, a medida que el error en el parámetro crece, el deterioro producido sobre las medidas estimadas aumenta.
- Independientemente del nivel de error de las medidas, la influencia de los errores de los parámetros es la misma.

Por lo tanto, de las Figuras 4.11 y 4.12 correspondientes a las inyecciones y flujos de potencia, se pueden obtener las siguientes conclusiones:

- La influencia del parámetro sobre las medidas de inyección, aun siendo importante, no lo es tanto como sobre las de flujo, especialmente a medida que disminuye el error de partida de dichas medidas.
- La influencia que el parámetro tiene sobre las medidas de flujo es notoria e independiente del error de partida de dichas medidas.

4.8 Resumen

En el presente capítulo se ha estudiado de un modo sistemático la influencia que los errores en los parámetros tienen sobre la estimación de estado, cosa que

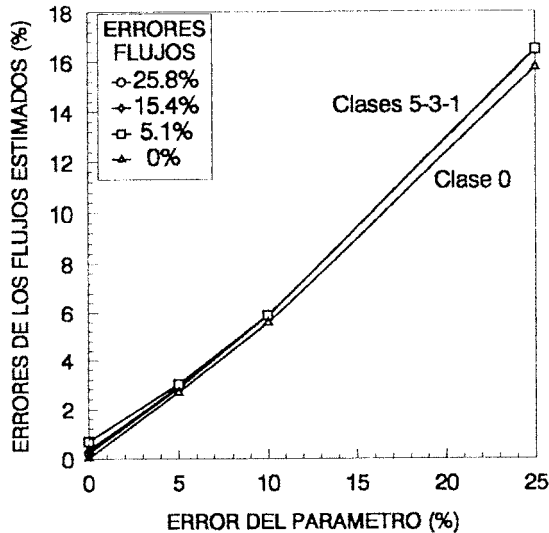


Figura 4.12: Influencia sobre las medidas de flujo adyacentes cuando todas las medidas son exactas excepto las de flujo.

no se había hecho hasta el momento en la literatura existente de estimación de parámetros.

Para ello, y con objeto de que los resultados obtenidos fueran significativos desde un punto de vista estadístico, cada una de las pruebas realizadas, y que posteriormente han sido plasmadas en diferentes figuras, representaban el valor medio de la ejecución de sesenta estimaciones de estado, considerando una línea distinta cada vez. Cada una de ellas representaba el estado existente en un instante determinado de un día y que previamente había sido generado.

La red utilizada ha sido la IEEE-14 que consta de veinte ramas, por lo que al utilizar sesenta estados distintos, cada línea ha sido ensayada tres veces. La caracterización de los resultados obtenidos se ha realizado a través de la clase de los dispositivos de medida, utilizando como índice comparativo el error relativo medio de las medidas estimadas (Sección 4.2).

Primeramente, en el Apartado 4.3 se ha analizado algo que parecía intuitivo, el carácter local del efecto de los errores sobre la estimación, y que gracias a las ensayos realizados ha permitido obtener las siguientes conclusiones:

- El deterioro producido sobre las medidas estimadas aumenta notablemente a medida que el error en el parámetro crece.

- El error en el parámetro influye mucho más sobre las medidas relacionadas directamente con la línea problemática que sobre las del resto de la red.
- Los resultados obtenidos son cualitativamente válidos para cualquier red, permaneciendo similares las curvas que se refieren a las medidas adyacentes y tendiendo a ser horizontales las que hacen referencia a las medidas de toda la red a medida que crece ésta, lo que confirma la localidad de la influencia del error en el parámetro.
- Los errores de las medidas estimadas cuando existe algún parámetro erróneo tienden a igualarse a los obtenidos cuando no existe dicho parámetro erróneo a medida que crece la distancia a la línea errónea.

Seguidamente se ha estudiado la influencia que podía tener el nivel de error en las medidas (Sección 4.4), concluyéndose que:

- Cuanto más exactas son las medidas de las que se dispone, los errores en los parámetros tienen mayor influencia sobre las medidas estimadas.
- Las conclusiones son válidas para cualquier red independientemente de su tamaño.

A continuación, del estudio comparativo de la presencia de errores en la conductancia o en la susceptancia (Epígrafe 4.5), se ha observado que los errores en la conductancia son menos significativos que los de la susceptancia. Debido a que los valores de la conductancia están sujetos a perturbaciones periódicas motivadas por cambios en la temperatura, mientras que los de la susceptancia sólo dependen del material del conductor y de la geometría de la configuración de la línea, este resultado obtenido es de suma importancia y va a permitir que el estudio se centre en la estimación de las susceptancias erróneas de la red.

En el Apartado 4.6 se ha analizado el efecto producido cuando los conjuntos de medidas existentes son:

- Tensiones y flujos de potencia.
- Tensiones e inyecciones de potencia.

habiéndose concluido que la influencia del parámetro erróneo sobre las medidas estimadas es mucho mayor cuando se dispone de medidas de flujos de potencia

que cuando se dispone de medidas de inyección, siendo en este último caso casi independiente de los errores de los parámetros.

Por último, en la Sección 4.7, se ha estudiado la influencia del parámetro sobre cada una de las medidas disponibles independientemente, llegándose a las mismas conclusiones que anteriormente, salvo que:

- La influencia del parámetro sobre las medidas de inyección disminuye a medida que el error de partida de dichas medidas lo hace.
- La influencia que el parámetro tiene sobre las medidas de flujo es independiente del error de partida de dichas medidas.

Capítulo 5

Estimación de Parámetros de Redes mediante Datos Históricos

5.1 Introducción

En el Capítulo 3 se han descrito los diferentes métodos existentes para la estimación de parámetros, habiéndose clasificado éstos de acuerdo con la forma en la que resuelven la ecuación planteada. También, a medida que se describían, se ha indicado si se trataba de métodos de resolución *on-line* u *off-line*.

Mientras que la detección de errores topológicos debe realizarse en forma *on-line* para que pueda serle útil al centro de control, la estimación de parámetros puede realizarse en modo *off-line*, si se desea, sin pérdida de efectividad.

En el presente capítulo se van a indicar las ventajas e inconvenientes de ambas formas de realizar la estimación de parámetros, describiéndose a continuación en detalle el método propuesto para la realización de la estimación, el cual se basa en la estimación de parámetros en modo *off-line*. Dicho método ha sido presentado en [103].

Por último, se va a analizar la forma de incluir la información previa existente sobre el parámetro y se estudiará el carácter local de la estimación de parámetros, cosa que ya se había apuntado previamente en el Apartado 4.3.

5.2 Estimación “on-line” frente a estimación “off-line”

La utilización de un método de estimación de parámetros *on-line* u *off-line* va a depender fundamentalmente de la importancia que se le quiera dar al hecho de disponer de los valores exactos de los parámetros en tiempo real.

Si la estimación se realiza en tiempo real, es decir, en modo *on-line*:

- Se puede llevar continuamente un seguimiento exacto de los parámetros de la red que se modifican debido a los cambios en las cargas y en las condiciones ambientales, como es el caso de la resistencia, las pérdidas por efecto corona y las tomas de los transformadores.
- Los parámetros estimados pueden ser actualizados inmediatamente en la base de datos para ser utilizados en otras aplicaciones de optimización y seguridad de la red.

El hecho de realizar un seguimiento exacto de los parámetros de la red no es un tema crucial, ya que éstos no cambian continuamente. De hecho, los que están sujetos a cambios constantes no influyen demasiado en la estimación de estado tal y como se concluyó en la Sección 4.5. Sin embargo, sí es interesante la realización de un seguimiento continuo de las posiciones de las tomas de los transformadores.

Es decir, puede considerarse distinto el tratamiento que deben recibir la estimación de los parámetros de la red y de las tomas de los transformadores.

En cuanto a la realización de la estimación en modo *off-line*:

- Las medidas que han sido capturadas por el sistema SCADA pueden ser trasladadas a un ordenador dedicado expresamente al proceso de estimación de parámetros o a otras actividades que no requieran una gran rapidez en el procesamiento. De este modo no se interfieren las funciones principales que se llevan a cabo en el centro de control.
- Los tiempos empleados en el procesamiento de la información y en los cálculos no son vitales, por lo que pueden utilizarse, si fuesen necesarios, algoritmos más precisos que provean soluciones más exactas.
- Mientras que los errores topológicos y las medidas con errores no gaussianos tienen una naturaleza temporal, es decir, son cambiantes con el tiempo, los errores en los parámetros son esencialmente permanentes.

5.3 Inclusión de la información previa existente sobre el parámetro

Por ello, se pueden seleccionar los conjuntos de medidas que se vayan a utilizar en la estimación de parámetros basándose por ejemplo, aunque no exclusivamente, en los residuos normalizados. De este modo se pueden elegir los *mejores* estados que posean menores errores así como los que tengan mayor redundancia, lo que no es posible en modo *on-line*.

- Los parámetros de red que sean sospechosos pueden ser identificados satisfactoriamente basándose en residuos normalizados grandes que se repitan constantemente y que afecten a las medidas, en la experiencia acumulada, etc., de acuerdo con lo expuesto en el Epígrafe 3.2.

Por todo ello, el método que posteriormente se desarrollará en el Apartado 5.4 se basará en un procesamiento *off-line*.

5.3 Inclusión de la información previa existente sobre el parámetro

La inclusión de la información previa existente sobre el parámetro que se va a estimar puede ser importante, tal y como se especificó en el Apartado 3.6, con objeto de evitar los posibles errores de observabilidad que pueden surgir.

Para conseguir esto la función objetivo se convierte en:

$$J(x, p) = \sum_{i=1}^m w_i [z_i - h_i(x, p)]^2 + w_p (p - p_0)^2 \quad (5.1)$$

añadiendo el valor del que se dispone del parámetro sospechoso como si se tratase de una medida adicional y siendo p_0 el valor conocido del parámetro.

En dicha ecuación aparece w_p , que es el factor de peso que se le asigna al valor conocido del parámetro. Una decisión importante es el valor que se le da a esta pseudomedida que se ha añadido, en comparación con los factores de peso de las telemidas w_i .

En el caso de que a w_p se le asignase un valor muy pequeño con respecto a w_i , equivaldría a rechazar completamente la información disponible p_0 y, por lo tanto, el valor del parámetro estimado \hat{p} sería determinado exclusivamente por las telemidas disponibles.

Por el contrario, si se utilizase un valor de w_p muy elevado con respecto a w_i , se obtendría que \hat{p} es similar a p_0 independientemente de los valores de las telemidas.

Esto se confirma en la Figura 5.1 en la cual se muestran los resultados obtenidos al estimar la susceptancia de una línea errónea mediante la ecuación (5.1). El ejemplo representado corresponde, en particular, a la línea que une los nudos 7 y 9 en la red IEEE-14. En dicha figura se representa el error relativo del parámetro estimado frente al ratio w_m/w_p , siendo w_m el valor medio de todos los factores de peso w_i .

Las curvas representadas han sido obtenidas con un conjunto de medidas de clase 1 y cuyo error medio ha sido del 3.23 %, así como asignando diferentes errores al valor conocido del parámetro p_0 : $\pm 5\%$, $\pm 10\%$.

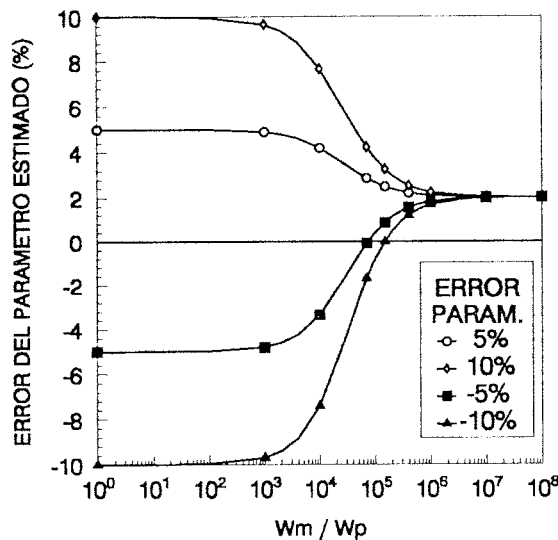


Figura 5.1: Error en la susceptancia estimada de la línea que une los nudos 7 y 9 en la red IEEE-14 frente al peso relativo del parámetro.

En dicha figura se confirma que:

- Si a w_p se le asigna un valor muy pequeño con respecto a w_m el valor del parámetro estimado \hat{p} se determina exclusivamente por las telemidas disponibles.
- Si a w_p se le asigna un valor muy elevado con respecto a w_m se obtiene un valor de \hat{p} similar a p_0 independientemente de los valores de las telemidas.

De la Figura 5.1 se deduce que pueden presentarse dos situaciones diferentes:

5.3 Inclusión de la información previa existente sobre el parámetro

- Si el signo del error asociado a p_0 es el mismo que el de \hat{p} cuando $w_p \approx 0$, lo que sucede para las curvas superiores de esta línea particular, el mejor resultado se obtiene cuando $w_p = 0$, a menos que p_0 sea más exacta que las teled medidas, lo que no parece lógico ya que se trata de una medida sospechosa.
- Si los dos signos son diferentes, lo que ocurre para las curvas inferiores, existe un cierto valor del factor de peso w_p para el cual se estima el parámetro exacto. Sin embargo, si no se elige este factor óptimo, puede ocurrir que el parámetro estimado sea peor que el que se obtendría si se hubiese utilizado el valor $w_p = 0$.

La Figura 5.2 es similar a la anterior pero para otra línea, en particular la línea que une los nudos 10 y 11, y otro conjunto de teled medidas distintos (la clase ha sido también 1 pero el error medio de las medidas ha sido 3.80 %). En este caso el parámetro estimado cuando $w_p = 0$ se encuentra en la parte inferior de la figura, obteniéndose las mismas conclusiones que anteriormente. La única salvedad es que cuando antes se refería a la parte superior de la figura ahora es la inferior y viceversa.

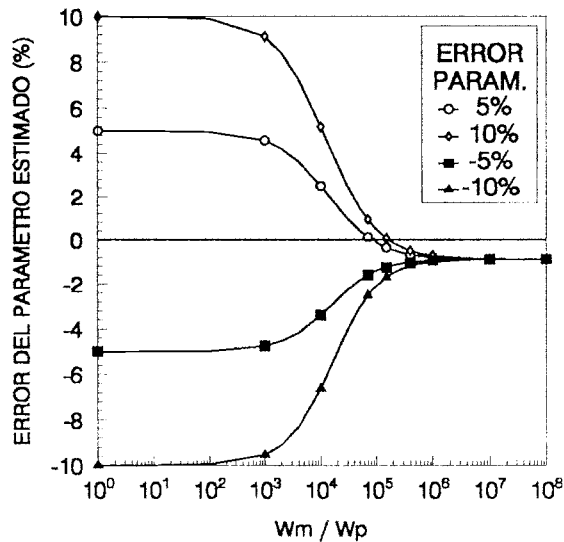


Figura 5.2: Error en la susceptancia estimada de la línea que une los nudos 10 y 11 en la red IEEE-14 frente al peso relativo del parámetro.

Por lo tanto, y ya que no es posible predecir a priori si el error resultante

para el parámetro será positivo o negativo, no se puede conocer su factor de peso óptimo w_p .

5.4 Método propuesto basado en datos históricos

El método propuesto para la estimación de parámetros se basa en las conclusiones obtenidas previamente en el Capítulo 4:

- La susceptancia es el parámetro cuyo error influye más en la estimación de las medidas.
- El parámetro es invariable con el tiempo.
- La influencia del error del parámetro es local.

Con ello, y teniendo en cuenta que según el Apartado 5.3 no resulta conveniente incluir la información previa existente sobre el parámetro, el método se basa en su ejecución en modo *off-line* de la forma más intuitiva:

- El vector de estado se aumenta con los parámetros sospechosos.
- Ya que lo único que no varía en la red de un momento a otro son los parámetros, se procesan varias muestras de diferentes momentos simultáneamente con objeto de aumentar la redundancia alrededor de los parámetros erróneos.

Además, con el uso simultáneo de varias muestras, la redundancia global del sistema se puede mantener aumentando el número de muestras. Así, siendo:

- m el número de medidas.
- n el número de variables de estado.
- n_p el número de parámetros sospechosos.
- q el número de estimaciones simultáneas que se van a procesar.

en el caso de que se utilice una única estimación y el número de parámetros sospechosos sea uno, la redundancia es:

$$K_1 = \frac{m}{n + 1} \quad (5.2)$$

Si el número de parámetros sospechosos aumenta, siendo ahora n_p , y si se desea que la redundancia siga siendo K_1 , bastará con que el número de estimaciones simultáneas que se procesen sea q , con lo que la redundancia será:

$$K_q = \frac{m \cdot q}{n \cdot q + n_p} = \frac{m}{n + \frac{n_p}{q}} \quad (5.3)$$

siendo $n_p = q$ para que $K_1 = K_q$.

En este método, al igual que en cualquiera de los otros métodos de estimación de parámetros existentes, si el sistema es crítico antes de estimar el parámetro, éste no podrá ser estimado.

El método propuesto basado en datos históricos de medidas evita el posible mal condicionamiento que puede producirse al mezclar los valores grandes, provenientes de los elementos de la submatriz del jacobiano correspondientes a las variables de estado habituales, y los pequeños, de la parte correspondiente a los parámetros, utilizando doble precisión.

Si se utilizan q estados simultáneamente para realizar la estimación, el vector de estados ampliado con los parámetros sospechosos es:

$$x = [x_1, x_2, \dots, x_q | p]^t \quad (5.4)$$

y el vector de medidas:

$$z = [z_1, z_2, \dots, z_q]^t \quad (5.5)$$

donde x_i y z_i son a su vez los vectores de estado y medidas de la muestra i .

Asimismo, la matriz jacobiano (cuyos elementos se pueden encontrar en el Apéndice C) queda, al añadirle las nuevas columnas correspondientes a los parámetros sospechosos y no añadirle ninguna fila adicional como inclusión de la información previa existente sobre el parámetro:

$$H = \begin{bmatrix} H_1 & & & h_{1p} \\ & H_2 & & h_{2p} \\ & & \ddots & \vdots \\ & & & H_q & h_{qp} \end{bmatrix} \quad (5.6)$$

Sustituyendo en las ecuaciones normales de la estimación de estado (2.19):

$$H^T W H \Delta x = H^T(x) W \Delta z \quad (5.7)$$

se obtiene que la matriz de ganancia G es:

$$G = H^t W H = \begin{bmatrix} G_{11} & & & g_{1p} \\ & G_{22} & & g_{2p} \\ & & \cdots & \vdots \\ & & & G_{qq} & g_{qp} \\ g_{1p}^t & g_{2p}^t & \cdots & g_{qp}^t & G_{pp} \end{bmatrix} \quad (5.8)$$

siendo:

$$G_{ii} = H_i^t W_i H_i \quad (i = 1, 2, \dots, q) \quad (5.9)$$

$$g_{ip} = H_i^t W_i h_{ip} \quad (i = 1, 2, \dots, q) \quad (5.10)$$

$$G_{pp} = \sum_{i=1}^q h_{ip}^t W_i h_{ip} \quad (5.11)$$

El vector de términos independientes queda:

$$H^t W \Delta z = [b_1, b_2, \dots, b_q | b_p]^t \quad (5.12)$$

siendo:

$$b_i = H_i^t W_i \Delta z_i \quad (i = 1, 2, \dots, q) \quad (5.13)$$

$$b_p = \sum_{i=1}^q h_{ip}^t W_i \Delta z_i \quad (5.14)$$

Para cada iteración es necesario que se forme y factorice la matriz (5.8) con objeto de poder obtener la corrección del vector de estado Δx . Esto, para redes de gran dimensión, es impracticable incluso utilizando técnicas de matrices dispersas, pero como el número de parámetros que se estiman es relativamente pequeño, se va a utilizar un método cuyo costo computacional es similar al necesario para resolver cada estado separada y secuencialmente.

Los pasos de que consta el método propuesto, que ha sido expuesto en [103], son:

1. Triangularización y eliminación hacia adelante. Para cada bloque diagonal ($i = 1, 2, \dots, q$):

(a) Calcular:

$$\hat{h}_{ip} = W_i h_{ip} \quad (5.15)$$

$$\Delta \hat{z}_i = W_i \Delta z_i \quad (5.16)$$

$$g_{ip} = H_i^t \hat{h}_{ip} \quad (5.17)$$

$$b_i = H_i^t \Delta \hat{z}_i \quad (5.18)$$

(b) Calcular G_{ii} y obtener y_i y b'_i de:

$$G_{ii} = H_i^t W_i H_i \quad (5.19)$$

$$G_{ii} y_i = g_{ip} \quad (5.20)$$

$$G_{ii} b'_i = b_i \quad (5.21)$$

(c) Actualizar G_{pp} y b_p :

$$G_{pp} = G_{pp} + h_{ip}^t \hat{h}_{ip} - g_{ip}^t y_i \quad (5.22)$$

$$b_p = b_p + h_{ip}^t \Delta \hat{z}_i - g_{ip}^t b'_i \quad (5.23)$$

2. Obtener Δp de:

$$G_{pp} \Delta p = b_p \quad (5.24)$$

3. Sustitución hacia atrás. Para cada bloque diagonal ($i = 1, 2, \dots, q$) obtener Δx_i de:

$$\Delta x_i = b'_i - y_i \Delta p \quad (5.25)$$

De este modo, una vez que Δp se ha obtenido, se pueden actualizar todas las variables de estado independientemente.

Con este método hay que puntualizar lo siguiente:

- Cada columna de h_{ip} es un vector muy disperso, ya que solamente las medidas adyacentes tienen derivadas respecto a p distintas de cero.
- Cada bloque diagonal G_{ii} se utiliza solamente una vez en el paso 1.(b), por lo que sólo la matriz de ganancia correspondiente a un único estado debe ser almacenada en memoria simultáneamente y por lo tanto, el mismo espacio es utilizado sucesivamente por diferentes estados.
- Si solamente se estima un único parámetro, h_{ip} es un vector columna y G_{pp} es un escalar.
- Si se utiliza un perfil plano de tensiones y desfases, en la primera iteración no se realiza la estimación del parámetro, es decir, se considera que el vector de estados no está ampliado por los parámetros sospechosos y, por lo tanto, la matriz jacobiano no contiene tantas columnas adicionales h_{ip} como parámetros sospechosos en esta primera iteración. Esto es debido a que dichas columnas se hacen cero por causa del perfil plano de partida. Por lo tanto, el método se utilizará después de la primera iteración.

En el caso de que el número de parámetros estimados sea pequeño, el sobre-coste, tanto en necesidades de memoria como en tiempos de cálculo, causado por las ecuaciones (5.15), (5.17), (5.20) y (5.22) - (5.25) es bastante pequeño en comparación con el costo del procesamiento secuencial de los diferentes estados, que viene marcado principalmente por las ecuaciones (5.19) y (5.21).

El método es válido tanto si se utiliza la red completa como si sólo se usa la parte de red que es relevante, es decir, la que rodea al parámetro sospechoso, lo que implica una considerable disminución del costo sin reducción de la calidad del estado estimado.

5.5 Carácter local de la estimación de parámetros

Al igual que ocurría con la influencia de los parámetros en la estimación de estado, que era reconocida por todos los autores y sin embargo no se había realizado un estudio sistemático y exhaustivo previamente, con la localidad de dicha influencia ocurre algo similar.

Así, en [58] se hace referencia a que *intuitivamente*, las medidas que se encuentran lejos de las líneas sospechosas tienen un impacto muy pequeño sobre los resultados de la estimación del parámetro y que por lo tanto, sólo se tendrá en cuenta una parte de la red completa a la hora de ejecutar el algoritmo de estimación de estado. Algo similar se menciona en [21].

En el Apartado 4.3 se ha estudiado el carácter local que tiene el efecto de los errores en los parámetros, habiéndose observado en las Figuras 4.3, 4.6 y 4.7 que los errores de las medidas estimadas cuando existe algún parámetro erróneo tienden a igualarse a los obtenidos cuando no existe dicho parámetro erróneo a medida que crece la distancia a la línea errónea.

Con objeto de completar este análisis se va a estudiar el carácter local de la estimación de parámetros desde el punto de vista del análisis de sensibilidad. Dicho análisis, que puede considerarse recíproco respecto al realizado en el Epígrafe 4.3, permitirá concluir si es necesario utilizar todas las medidas para realizar la estimación de parámetros o sólo aquellas respecto a las que es sensible.

Para realizarlo, se ha considerado que al vector z se le ha añadido una fila adicional correspondiente al valor conocido del parámetro y además, todas las covarianzas son idénticas.

En la Sección 2.3 se obtuvieron las ecuaciones normales del problema de

mínimos cuadrados ponderados (2.19):

$$G(x)\Delta x = H^T(x)W[z - h(x)] \quad (5.26)$$

de donde el vector de estado estimado es:

$$\Delta \hat{x} = G^{-1}H^T(x)W[z - h(x)] \quad (5.27)$$

y las medidas estimadas, utilizando el modelo linealizado del estimador de estado, son:

$$\Delta \hat{z} = H\Delta \hat{x} = S(W\Delta z) \quad (5.28)$$

siendo S la matriz de sensibilidad entre las medidas ponderadas $W\Delta z$ y las medidas estimadas $\Delta \hat{z}$:

$$S = HG^{-1}H^T \quad (5.29)$$

Cuando Δz es completamente nulo, salvo en la posición k -ésima, la columna k -ésima de S proporciona los cambios en las medidas estimadas al producirse una perturbación en la medida k -ésima, por lo que dicha columna se expresa como:

$$S_k = Se_k \quad (5.30)$$

siendo e_k un vector columna completamente nulo excepto con un 1 en la posición k -ésima.

Por lo tanto, la columna k -ésima de S se puede obtener de:

$$S_k = HG^{-1}H^T e_k \quad (5.31)$$

mediante los siguientes pasos:

1. Realizar la operación $H^T e_k$, que no es más que hallar la fila k -ésima de H .
2. Hallar y a partir de:

$$Gy = H^T e_k \quad (5.32)$$

mediante eliminación hacia adelante y sustitución hacia atrás.

3. Calcular:

$$S_k = Hy \quad (5.33)$$

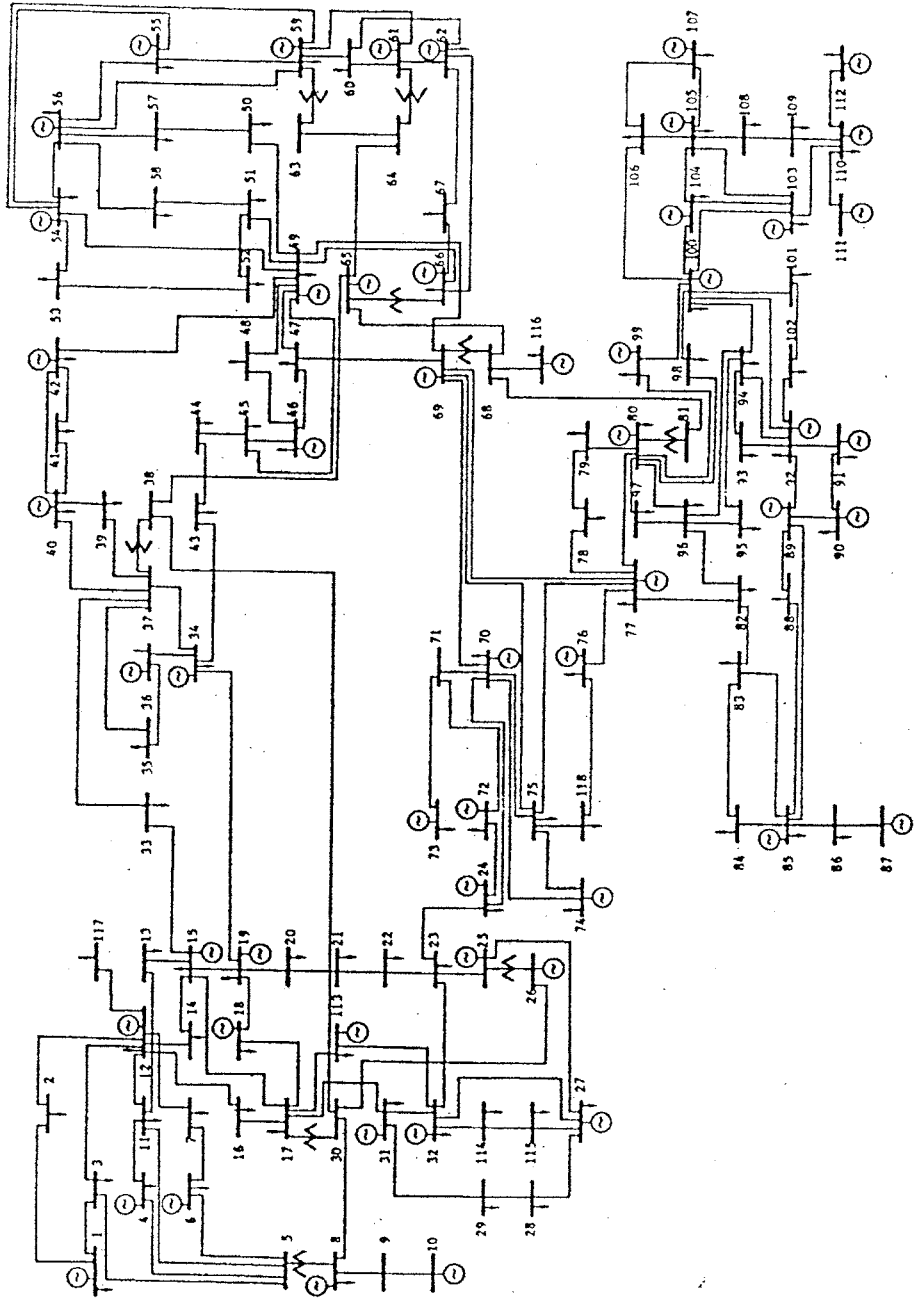


Figura 5.3: Red IEEE-118.

Para realizar el análisis de sensibilidad se ha usado la red de ciento dieciocho nudos y ciento setenta y nueve líneas IEEE-118 [55] representada en la Figura 5.3.

Al igual que ocurrió con la red IEEE-14, con objeto de considerar diversos estados de la red a lo largo de un día, se han tomado veinticuatro muestras equivalentes a las horas de un día y se ha considerado que existe la máxima redundancia, por lo que el número total de medidas en cada estado es de mil setenta.

Dichos estados son los estados exactos de la red, pero que realmente nunca son conocidos. Por ello, y con objeto de poder simular la realidad, a los estados exactos se les ha sumado un error gaussiano obtenido con un generador de números aleatorios a partir de la desviación típica σ de cada medida.

El valor de σ considerado es función del fondo de escala, tal y como se hizo en la generación de medidas reales de la red IEEE-14, habiéndose utilizado:

- Para las medidas de tensión: $\sigma = 0.1 * \gamma * FE$.
- Para las medidas de potencia: $\sigma = \gamma * FE$.

donde γ es la clase del dispositivo de medida, y que para este caso concreto se ha considerado clase 1, y FE es el fondo de escala de dicho aparato, siendo el de los dispositivos medidores de tensión 1.

Los fondos de escala considerados para cada aparato de medida dependen del máximo valor esperado en cada punto de medida. Por el hecho de ser distintos, se han agrupado en torno a varios valores a fin de que no haya mucha diversidad de valores.

En el Apéndice D se muestran los fondos de escala considerados para las inyecciones en los nudos así como los flujos en las ramas para ambos extremos de la línea, todo ello en por unidad y sobre una base de 100 MVA.

Tal y como se definió en el Epígrafe 4.3, se entiende por medidas a *distancia 1* las adyacentes a la rama que contiene el parámetro erróneo, es decir, las tensiones e inyecciones de los nudos extremos de la rama y los flujos de la propia rama, por medidas a *distancia 2* las anexas a las que se encuentran a *distancia 1* y así sucesivamente.

Con estas premisas se ha realizado el estudio calculando las sensibilidades de todas las medidas y, una vez detectada cuál es la que tiene mayor valor, se han normalizado todas con ella, es decir, se ha dividido el valor máximo entre todos los valores de sensibilidades. Esto permite conocer el número de medidas que tienen una sensibilidad 10, 20, ... veces menor que la que tiene mayor valor de sensibilidad.

A continuación, se han agrupado estos valores obtenidos en función de la *distancia* a la que se encuentran dichas medidas de la línea errónea, con lo que se puede obtener, para diferentes *distancias*, el tanto por ciento de medidas (con respecto al número total de medidas que están a dicha *distancia*), que tienen una sensibilidad 10, 20, ... veces menor que la que tiene mayor valor.

Esto es lo que se ha representado en Figura 5.4 en la que en el eje X aparece la *distancia* a la línea errónea, en el Y la relación entre la sensibilidad máxima y las sensibilidades de las medidas y en el eje Z el tanto por ciento de medidas con respecto al total de medidas que se encuentran a esa *distancia*.

Así, por ejemplo, en la figura se puede observar que entre 0 y 1 del eje X (que representa la *distancia 1* de la línea errónea) y entre 0 y 10 del eje Y (que representa una sensibilidad entre 1 y 10 veces menor que la medida más sensible), se encuentran el 60 % de las medidas que están a *distancia 1*.

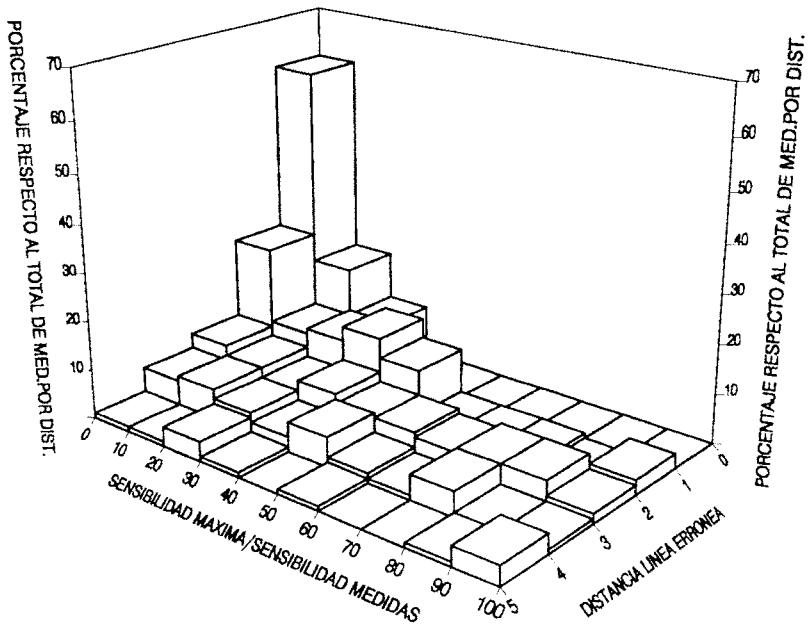


Figura 5.4: Resultado del análisis de sensibilidad de la línea que une los nudos 49 y 51 en la red IEEE-118.

La rama que contiene el parámetro erróneo en dicha figura es la que une los

nudos 49 y 51. Dicha línea posee medidas que pueden encontrarse hasta una *distancia 10* de ella, teniendo las que se encuentran a una *distancia* superior a 5 una sensibilidad cien veces inferior a la medida más sensible, por lo que ya no se han representado.

En dicha figura se observa que:

- Las medidas que se encuentran a distancias menores son las más sensibles (sensibilidades solamente entre 10 y 30 veces inferiores al valor máximo).
- Cuanto menor es la distancia, el porcentaje de medidas con valores más altos de sensibilidad es mayor.
- Las medidas que se encuentran a una *distancia* superior a 5, en este caso concreto, tienen una sensibilidad cien veces menor que la medida más sensible.

Por lo tanto, se puede concluir que:

- Las medidas que se encuentran lejos de las líneas con algún parámetro erróneo tienen un impacto muy pequeño sobre ella.
- No es necesario utilizar ni todas las medidas de las que se disponga ni toda la red completa para realizar la estimación de parámetros, sino sólo aquellas medidas y aquellas líneas que se encuentran más próximas a la que contiene el parámetro erróneo, ya que éstas son las más sensibles.

Estas conclusiones van a permitir que en el Capítulo 6, en lugar de utilizar la red IEEE-118 para la obtención de los resultados experimentales, se utilice la IEEE-14 como si se tratase de la subred más próxima a la línea con el parámetro erróneo.

Para pasar de una red a su subred correspondiente basta con introducir los flujos de las líneas por las que se corta la subred en las inyecciones de los nudos limítrofes.

5.6 Resumen

En este capítulo se han presentado las ventajas e inconvenientes de la estimación *off-line* frente a la *on-line* (Sección 5.2), justificándose el motivo por el que el método de estimación de parámetros propuesto se basa en la estimación *off-line*.

Seguidamente (Apartado 5.3) se ha analizado el hecho nada trivial de incluir o no la información previa existente sobre el parámetro. Se ha obtenido que, dependiendo del factor de peso que se le asigne al parámetro que se va a estimar, los resultados obtenidos al considerar la información previa pueden ser mejores o peores que los obtenidos al no considerarla.

Por ello, y ya que no es posible conocer el factor de peso óptimo del parámetro, no será utilizada la información previa del parámetro.

A continuación, en el Epígrafe 5.4 se ha explicado el método propuesto, el cual se basa en la utilización de varias estimaciones simultáneamente, ya que lo único invariante en todas ellas son los parámetros que se estiman. El método lo que hace es:

- Aumentar el vector de estado con los parámetros sospechosos.
- Procesar muestras de diferentes momentos *simultáneamente* con objeto de aumentar la redundancia alrededor de los parámetros erróneos.

Por último, en el Apartado 5.5 se ha estudiado el carácter local de la estimación de parámetros mediante un análisis de sensibilidad habiéndose obtenido la conclusión de que:

- Las medidas que se encuentran lejos de las líneas con algún parámetro erróneo tienen un impacto muy pequeño sobre ella.
- No es necesario utilizar ni todas las medidas de las que se disponga ni toda la red completa para realizar la estimación de parámetros, sino sólo aquellas medidas y aquellas líneas que se encuentran más próximas a la que contiene el parámetro erróneo.

Capítulo 6

Resultados Experimentales

6.1 Introducción

En el presente capítulo se van a presentar los distintos resultados obtenidos utilizando el método de estimación de parámetros propuesto en el Capítulo 5. Para ello, y puesto que, según las conclusiones obtenidas en el Apartado 5.5, la estimación de parámetros tiene un carácter local, se va a considerar a la red IEEE-14 como una subred de la IEEE-118 en la que se encuentran los parámetros erróneos y, por lo tanto, es ella la que se va a utilizar para mostrar los resultados experimentales obtenidos con el método propuesto.

Asimismo, los resultados que se presentan han sido obtenidos considerando que el error se encuentra en la susceptancia de la línea considerada, ya que según se vio en el Apartado 4.5, la influencia del error en la susceptancia es mucho mayor que cuando éste existe en la conductancia, además de ser invariante con el tiempo, lo que representa la base del método propuesto.

Al igual que se hizo en el Capítulo 4, y con objeto de que los resultados obtenidos sean estadísticamente significativos, cada una de las pruebas representa el valor medio de la ejecución de sesenta estimaciones de estado. Además, y excepto en los casos en los que expresamente se indique, se va a utilizar una redundancia de las medidas completa, lo que significa que de cada estado se poseen ciento veintidós medidas distintas.

Dichos estados distintos han sido obtenidos, como se dijo en el Apartado 4.1, a partir de mil ochocientos estados distintos y exactos, que nunca son conocidos, y a los que se les ha añadido errores gaussianos que simulen el estado real del sistema.

Por último, para caracterizar los resultados obtenidos se ha utilizado prin-

principalmente la clase de los dispositivos de medida, así como el error relativo medio de las medidas afectadas en las sesenta estimaciones. Además, el índice comparativo adoptado ha sido el error relativo medio de las medidas estimadas.

6.2 Estimación de impedancias o admitancias

La estimación de la susceptancia errónea puede realizarse desde el punto de vista de tratarla como impedancia o como admitancia. El hecho de tratarla como admitancia tiene la ventaja de:

- Menor manipulación, ya que las ecuaciones se utilizan en modo de admitancias.
- No se presentan singularidades, como ocurre al considerar una línea abierta.

Además, como el valor del parámetro estimado obtenido al realizar la estimación como impedancia o como admitancia es el mismo tras numerosas comprobaciones realizadas, se va a realizar la estimación tratando al parámetro erróneo como admitancia en lugar de como impedancia.

6.3 Influencia del número de muestras utilizadas

En el Capítulo 5 se describió el método propuesto, el cual se basaba en la utilización de datos históricos de medidas y aprovechaba que el parámetro era invariante con el tiempo para realizar su estimación usando varias muestras de estados diferentes por los que pasa el sistema a lo largo del día.

Por lo tanto, es importante saber cuál es el número óptimo, si existe, de estados que hay que utilizar simultáneamente para realizar la estimación. Para analizar esto, en la Figura 6.1 se representa el cociente entre el error medio de las telemedidas y el error del parámetro estimado cuando el número de estados diferentes utilizados varía desde uno hasta veinticinco. Cada uno de los puntos representados es la media de sesenta ensayos diferentes con una redundancia completa de las medidas, siendo éstas de clase 1 y existiendo un error en el parámetro del 10 %.

El ratio utilizado en dicha figura proporciona una cuantificación de la habilidad del estimador para estimar un parámetro de red, pudiéndose observar

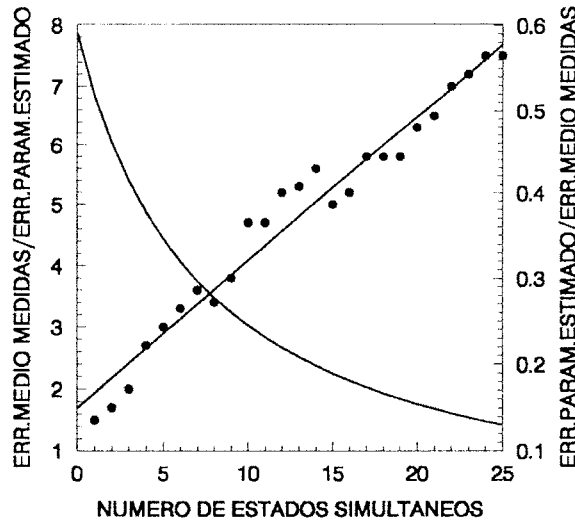


Figura 6.1: Relación entre el error de las medidas y el error del parámetro estimado frente al Número de estados procesados simultáneamente.

que a medida que aumenta el número de estados procesados simultáneamente la estimación realizada es mejor. Para poder apreciar mejor dicho resultado, se ha dibujado la recta de regresión obtenida con los puntos señalados, pudiéndose apreciar que los resultados obtenidos siguen una correlación lineal, por lo que cuanto mayor sea el número de estados procesados simultáneamente menor será el error del parámetro estimado.

Asimismo, en la misma figura se ha representado la inversa de la curva de regresión, es decir, el cociente entre el error del parámetro estimado y el error medio de las medidas, la cual es una hipérbola. Esta curva muestra que a medida que crece el número de estimaciones utilizadas simultáneamente la mejoría obtenida es menor, observándose además que en el límite el error del parámetro estimado vale cero.

Seguidamente, en la Tabla 6.1 se muestra la influencia de diversos errores en la susceptancia de una línea cuando se utilizan en la estimación del parámetro uno y siete estados diferentes simultáneamente y las medidas del sistema son de clase 1; se muestra tanto la influencia sobre las medidas de toda la red como sobre las medidas adyacentes a la rama, indicándose además el error de las medidas utilizadas. Se ha realizado el procesamiento de siete estados diferentes simultáneamente por considerar que la estimación obtenida

Número de estados	Error parám. (%)	Errores medidas est. (%)		Errores medidas (%)	
		Todas	Adyacentes	Todas	Adyacentes
1	0	1.27	1.26	2.7	2.8
	10	1.27	1.26		
	25	1.27	1.26		
7	0	1.31	1.26	2.9	2.8
	10	1.31	1.26		
	25	1.31	1.26		

Tabla 6.1: Influencia del error de la susceptancia de una línea sobre las medidas cuando se estima el parámetro.

con ellos es suficientemente buena, de acuerdo con la hipérbola representada en la Figura 6.1.

En dicha tabla se puede observar además que los estados estimados son insensibles a los errores en los parámetros, es decir, el error en las medidas estimadas cuando existe un error de un 25 % en el parámetro es el mismo que cuando dicho error no existe, lo que demuestra la efectividad del método propuesto.

6.4 Relación con el nivel de error en las medidas

En el presente epígrafe se va a analizar la influencia que tiene el nivel de error en las medidas, realizándose dicho análisis solamente sobre las medidas adyacentes a la línea que tiene el parámetro erróneo ya que, de acuerdo con las conclusiones obtenidas en la Sección 4.3, la influencia del error en el parámetro es mucho más pronunciada sobre las medidas adyacentes a la línea problemática, tendiendo a disminuir a medida que aumenta la distancia.

Para ello, en las Figuras 6.2 y 6.3 se representa la influencia de un error de un 10 % en la susceptancia de una línea cuando se utilizan en la estimación uno y siete estados diferentes simultáneamente, las medidas del sistema son de clase 0, 1, 3 y 5 y analizando solamente la influencia sobre las medidas adyacentes a la línea sospechosa.

La conclusión que se puede obtener de estas figuras es la misma que se

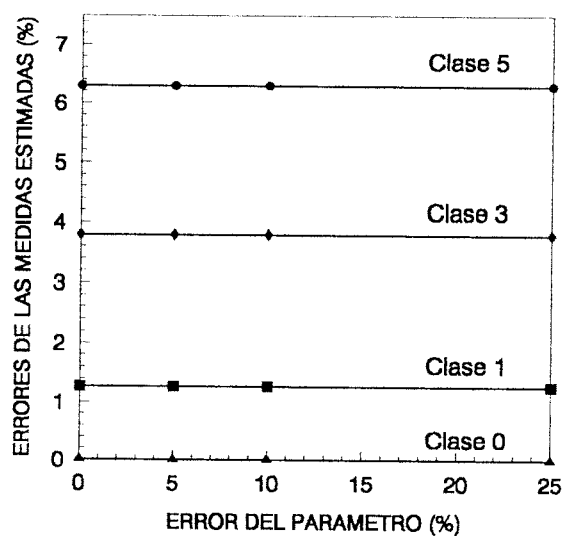


Figura 6.2: Influencia del error en la susceptancia de una línea sobre las medidas adyacentes, con distintas clases, cuando se procesa un estado.

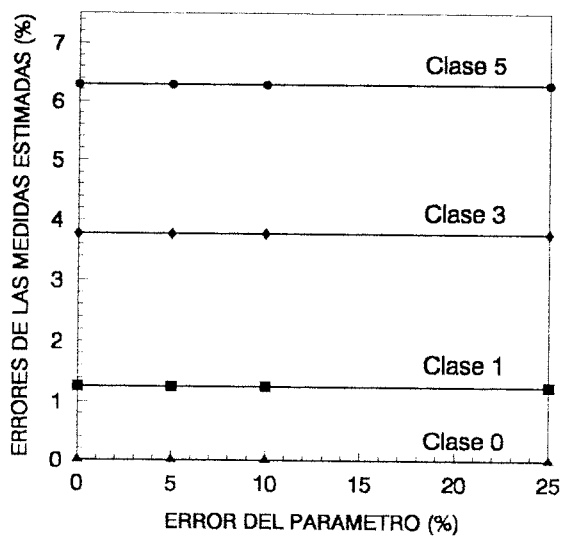


Figura 6.3: Influencia del error en la susceptancia de una línea sobre las medidas adyacentes, con distintas clases, cuando se procesan siete estados simultáneamente.

obtuvo en el Apartado 6.3, es decir, que los estados estimados son insensibles a los errores en los parámetros y ello independientemente del nivel de error de las telemedidas. Además, al aumentar los errores de las medidas de las que se dispone, los errores de los valores estimados obtenidos son mayores.

Con objeto de apreciar más claramente el efecto beneficioso que el método propuesto proporciona, en la Figura 6.4 se muestra la influencia sobre las medidas adyacentes, para distintos niveles de errores en las medidas, cuando solamente existe error en la susceptancia de una línea:

- Sin estimar el parámetro erróneo (línea discontinua).
- Estimando el parámetro erróneo utilizando siete estados simultáneamente (línea continua).

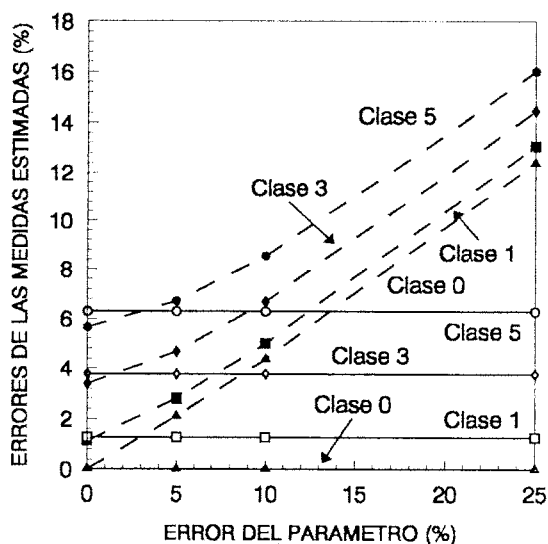


Figura 6.4: Influencia del error en la susceptancia de una línea sobre las medidas adyacentes, con distintas clases, cuando: (a): No se realiza estimación de parámetros; (b): Se estima procesándose siete estados simultáneamente.

Cada una de las gráficas representa la media de la ejecución de sesenta estimaciones de estado.

Hay que hacer notar en esta figura que la no coincidencia de valores cuando el error en el parámetro es 0 % es debido a que los errores en las medidas usadas cuando no se estima el parámetro y cuando sí se estima es distinto, según se

Clase	Error medidas usadas sin est. parámetro	Error medidas usadas estimando parámetro
5	11.1	14.2
3	6.7	8.5
1	2.2	2.8
0	0.0	0.0

Tabla 6.2: Errores de las medidas adyacentes utilizadas sin estimar parámetro y estimándolo.

aprecia en la Tabla 6.2. Esto es lógico ya que cuando no se estima el parámetro se utilizan sesenta estados distintos como ya se ha indicado, mientras que cuando sí se estima, el número de estados utilizados es siete veces mayor, ya que para cada estimación del parámetro se usan siete estados distintos.

Por último, en la Tabla 6.3 se presenta el error del parámetro estimado y la relación entre el error medio de las telemidas y el error del parámetro estimado, todo ello con diferentes niveles de errores en las medidas, distinto número de estados utilizados simultáneamente y redundancia completa.

De los resultados presentados en dicha tabla se puede concluir que:

- El error del parámetro estimado es proporcional al error medio del conjunto de medidas. Así, si se consideran los resultados obtenidos cuando se realiza la estimación utilizando siete estados simultáneamente, la relación que existe entre el error medio de las telemidas (cociente entre los valores de la columna (a)), es casi igual a la existente entre los errores del parámetro estimado (cociente entre los valores de la columna (b)).

Resultados similares se obtienen al analizar los valores obtenidos cuando se realiza la estimación utilizando cuatro estados simultáneamente y uno.

- El ratio utilizado, que relaciona el error medio de las medidas y el error del parámetro estimado, sólo es función del nivel de redundancia de dichas telemidas, a juzgar por la constancia de la columna de la derecha para un mismo número de estados.

Núm. estados	(a)	(b)	(a/b)
7	14.26	3.27	4.4
	8.56	1.95	4.4
	2.85	.65	4.4
4	14.20	4.38	3.2
	8.52	2.65	3.2
	2.84	.90	3.2
1	13.53	8.73	1.5
	8.10	5.27	1.5
	2.70	1.70	1.6

Tabla 6.3: Errores de los parámetros estimados para diferentes niveles de errores en las medidas y redundancia completa. (a): Error medio de las telemedidas (%); (b): Error del parámetro estimado (%).

6.5 Influencia del tipo de medidas disponibles

En el Apartado 4.6 se analizó la influencia que tenían el tipo de medidas disponibles y los errores en los parámetros sobre la estimación de estado, llegándose a la conclusión de que, cuando se dispone de medidas de flujos de potencia, la influencia del parámetro erróneo es mucho mayor que cuando se dispone de medidas de inyecciones, siendo la influencia en este último caso casi nula.

En el presente epígrafe se van a mostrar los resultados experimentales obtenidos al utilizar el método propuesto cuando se dispone de distintos tipos de medidas. Así, en las Tablas 6.4 y 6.5 se muestran los resultados obtenidos al realizar la estimación de parámetros cuando se dispone únicamente de medidas de tensiones e inyecciones de potencia y cuando se dispone de tensiones y flujos de potencia respectivamente. Ambos casos para distintos niveles de errores en las medidas y cuando se utilizan siete estados simultáneamente para realizar la estimación.

De dichas tablas se puede obtener la conclusión de que el método de parámetros propuesto también es válido para este caso, obteniéndose óptimos resultados independientemente del error que tenga el parámetro de la línea sospechosa.

Asimismo, prestando atención en ambas tablas a las columnas de errores

Clase	Error parám. (%)	Errores medidas estimadas (%)	Errores medidas utilizadas (%)
0	0	0.0	0.0
	10	0.0	
	25	0.0	
1	0	1.69	1.78
	10	1.69	
	25	1.69	
3	0	5.08	5.34
	10	5.08	
	25	5.08	
5	0	8.46	8.90
	10	8.46	
	25	8.46	

Tabla 6.4: Influencia del error de la susceptancia de una línea cuando sólo se dispone de medidas de tensiones e inyecciones y se estima dicho parámetro.

Clase	Error parám. (%)	Errores medidas estimadas (%)	Errores medidas utilizadas (%)
0	0	0.0	0.0
	10	0.0	
	25	0.0	
1	0	1.64	2.95
	10	1.64	
	25	1.64	
3	0	4.93	8.37
	10	4.93	
	25	4.93	
5	0	8.22	14.73
	10	8.22	
	25	8.22	

Tabla 6.5: Influencia del error de la susceptancia de una línea cuando sólo se dispone de medidas de tensiones y flujos y se estima dicho parámetro.

de las medidas y de errores de las medidas estimadas se puede observar que la estimación obtenida cuando existen medidas de flujos es mucho mejor que la que se obtiene cuando se dispone únicamente de medidas de inyecciones.

También es interesante conocer qué resultados se obtienen de la estimación en función del número de muestras utilizadas, tal y como se estudió en la Sección 6.3, pero ahora desde el punto de vista del tipo de medidas disponibles. Para ello, en la Figura 6.5 se representa el cociente entre el error medio de las medidas usadas y el error del parámetro estimado cuando el número de estados diferentes utilizados varía desde uno hasta veinticinco tal y como se hizo en la Figura 6.1, pero añadiendo además las curvas correspondientes a cuando se dispone de medidas de tensiones e inyecciones y cuando se dispone de medidas de tensiones y flujos.

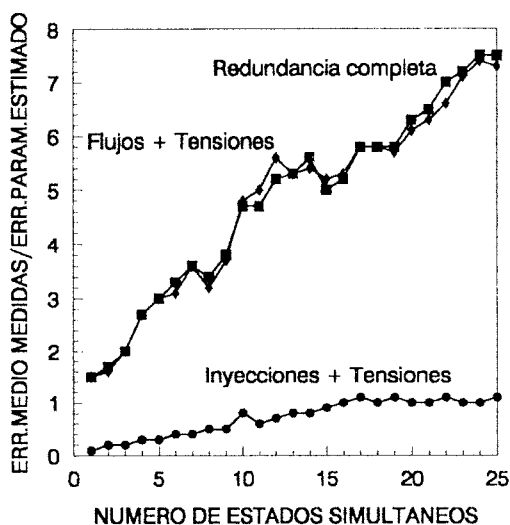


Figura 6.5: Media del error de las medidas / Error del parámetro estimado frente al Número de estados procesados simultáneamente con diferente redundancia.

Las tres curvas se han representado en la misma figura para poder analizar más claramente su influencia, pudiéndose concluir que:

- A medida que aumenta el número de estados procesados simultáneamente la estimación realizada es mejor.
- Las medidas de inyecciones de potencia no son las adecuadas para realizar

una buena estimación, ya que como se vio en el Apartado 4.6 dichas medidas son menos sensibles a los errores en los parámetros que las medidas de flujos. Además, esta conclusión coincide plenamente con la apreciada en las Tablas 6.4 y 6.5.

6.6 Estimación de varios parámetros simultáneamente

Hasta el momento siempre se ha discutido acerca de la influencia tan negativa que tienen los errores de los parámetros sobre la estimación de estado. Sin embargo, dicha influencia sólo se ha mostrado cuando existía un única línea errónea. Asimismo, los resultados experimentales que confirman que el método propuesto en la presente Tesis es bueno también corresponden a un único parámetro erróneo.

En esta sección se va a mostrar lo que ocurre cuando existe más de un parámetro erróneo y los resultados experimentales obtenidos con el método propuesto.

En particular, las figuras que se presentan se han realizado, al igual que el resto de las mostradas anteriormente, para distintos niveles de errores en las medidas, diferentes errores en los parámetros y representando cada punto la media de sesenta ensayos realizados con el fin de que la muestra sea estadísticamente representativa. Además, en cada uno de esos ensayos, se han elegido cinco líneas distintas y escogidas arbitrariamente mediante un generador de números aleatorios. Por lo tanto, al considerar que son cinco las líneas erróneas que se tienen y hacerse el ensayo sobre la red IEEE-14, la cual posee veinte líneas en total, se está suponiendo que el 25 % de la red completa es errónea, por lo que se trata de un caso muy desfavorable, ya que las líneas erróneas se encuentran muy próximas unas de otras.

Si se hubiese utilizado la red IEEE-118, al elegir aleatoriamente las cinco líneas, estas normalmente estarán tan alejadas unas de otras que sus errores son independientes unos de otros, cosa que en la red IEEE-14 no ocurre.

En la Figura 6.6 se representa la influencia de los errores de las susceptancias de cinco líneas sobre las medidas de toda la red cuando no se estiman los parámetros.

Las conclusiones que se obtienen de dicha figura son idénticas a las obtenidas en el Capítulo 4 cuando se analizó la influencia de una única línea errónea, es decir:

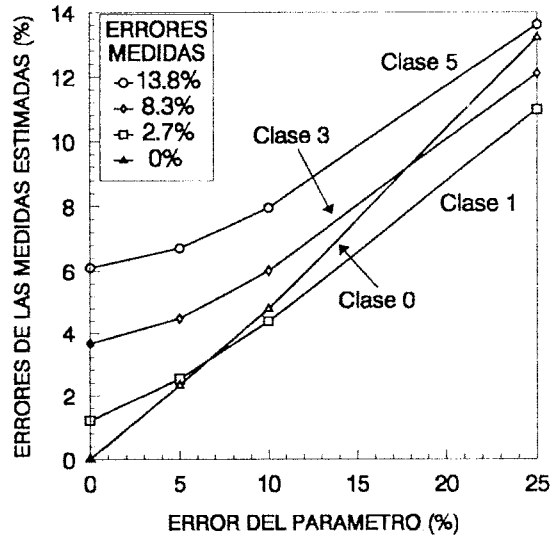


Figura 6.6: Influencia del error en la susceptancia de cinco líneas sobre las medidas de toda la red, con distintas clases.

- Existe un notable deterioro a medida que el error en el parámetro crece.
- Cuanto más exactas sean las medidas de las que se dispone, mayor es la influencia que tienen los errores en los parámetros.

En particular, es digno de destacar la notable influencia que tiene el aumento del error en los parámetros cuando las telemidas de las que se dispone no tienen errores, es decir, son exactas.

Por último, en la Figura 6.7 se muestran los resultados obtenidos cuando se estiman los parámetros de las cinco líneas erróneas utilizando el método propuesto y siete estados diferentes simultáneamente.

El hecho de utilizar siete estados diferentes simultáneamente, como se hizo anteriormente, es debido a que se considera que éste es un compromiso bueno entre la exactitud de la estimación y el tiempo empleado en el procesamiento.

En dicha figura se puede observar que los estados estimados son insensibles a los errores en los parámetros a pesar de ser cinco las líneas erróneas y encontrarse tan próximas unas de otras.

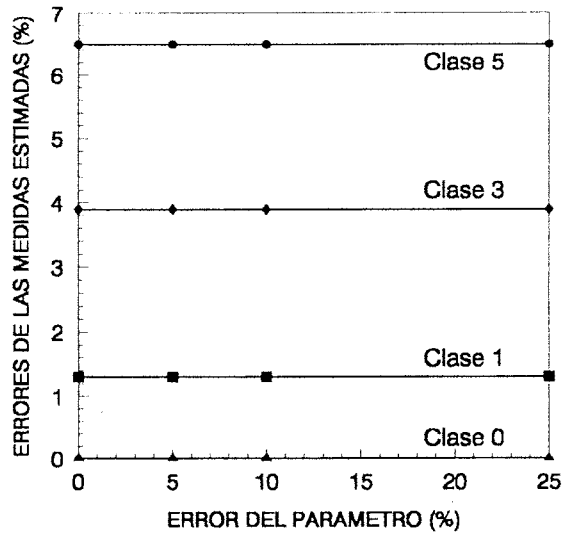


Figura 6.7: Influencia del error en las susceptancias de cinco líneas sobre las medidas de toda la red, con distintas clases, cuando se procesan siete estados simultáneamente.

6.7 Optimalidad de los parámetros estimados

Uno de los resultados más importantes obtenidos es el hecho de que para un conjunto de medidas con un determinado nivel de error, los valores de los parámetros estimados son los mismos independientemente del valor de partida de dicho parámetro, lo cual es lógico, ya que dicha información sólo se ha usado en el primer jacobiano. Este valor de partida del parámetro corresponde al dato que se conoce de él.

Este resultado se puede observar en la Tabla 6.6, en la que se muestran los valores estimados del parámetro de la línea que une los nudos 7 y 9, para distintos valores de partida de dicho parámetro y cuando se utiliza el método propuesto para estimarlo, siendo las medidas de las que se dispone de clase 1.

En concreto, el valor de partida -9.090 coincide con el valor exacto del parámetro, por lo que se puede observar que el error cometido al realizar su estimación es de un 2.02 %.

Esta tabla, junto con las conclusiones obtenidas de la Tabla 6.3, indican que los parámetros estimados son óptimos para un determinado nivel de ruido y para una redundancia de las medidas utilizadas. Así, si el valor de partida

Parámetro de partida	Parámetro estimado
-8.806	-8.906
-8.900	-8.906
-9.000	-8.906
-9.090	-8.906
-9.270	-8.906

Tabla 6.6: Valores estimados del parámetro para distintos valores de partida de éste.

del parámetro es muy bueno, es decir, es casi exacto, pero las medidas de las que se dispone son de baja calidad, es posible que el parámetro estimado sea peor que el de partida; y viceversa. De ahí la importancia de la selección previa de las líneas sospechosas.

Esto es debido al hecho de no haber utilizado la información previa existente sobre el parámetro, tal y como se discutió en el Apartado 5.3, y por lo tanto estimarse el parámetro de acuerdo con la información proporcionada por las telemidas que se poseen.

6.8 Resultados del estimador con los parámetros mejorados

Una vez que se ha estimado el parámetro erróneo de una determinada línea, podría haber la posibilidad de utilizar el nuevo valor para volver a realizar la estimación con objeto de obtener un refinamiento mayor en el parámetro estimado.

Esto se ha realizado para la misma línea utilizada en el Apartado 6.7, es decir, la que une los nudos 7 y 9, y se ha obtenido el resultado representado en la Tabla 6.7. Ésta es similar a la Tabla 6.6 pero utilizando como valor de partida del parámetro el mismo que se había obtenido de una estimación anterior y que, como se obtuvo en el Apartado 6.7, es óptimo para un determinado nivel de ruido y redundancia de las medidas utilizadas.

Se puede observar que el nuevo parámetro estimado es el mismo que el estimado con anterioridad ya que, como se dijo anteriormente, no se ha hecho uso de la información previa existente sobre el parámetro.

Parámetro de partida	Parámetro estimado
-8.906	-8.906

Tabla 6.7: Valor estimado del parámetro cuando se parte de un valor estimado previamente.

Por lo tanto se puede concluir que, si se utiliza el estimador con los parámetros que previamente se hayan estimado, usando la misma redundancia y con el mismo nivel de error en las telemidas, no se obtiene ninguna mejoría. De esta manera, de una sola vez, se está considerando el mismo efecto que el filtro de Kalman de forma recursiva.

6.9 Coste computacional del método propuesto

El método propuesto para la estimación de parámetros, tal y como se ha expuesto en el Apartado 5.4, es similar a los métodos de estimación de estado habituales pero con el vector de estado ampliado. Ello puede dar lugar a que la matriz jacobiano sea mayor y, por lo tanto, que los tiempos necesarios para realizar la estimación sean también mayores.

Para comprobar si el incremento de tiempos cuando se estima el parámetro es mucho mayor que el necesario para realizar el proceso normal de estimación de estado, se va a proceder a estudiar lo que ocurre cuando no se estima y cuando sí se estima el parámetro en la red IEEE-118 representada en la Figura 5.3, utilizándose el entorno de simulación descrito en el Epígrafe 5.5.

La prueba realizada ha consistido en realizar la estimación del estado con el parámetro erróneo, pero sin estimarlo, y realizar posteriormente la estimación del parámetro con el método propuesto. El incremento en tiempo producido al hacer la estimación del parámetro es de un 24 % sobre el tiempo total necesario para la estimación de estado. Este valor es aproximadamente independiente de la línea en la que se considere que el parámetro es erróneo y el número de iteraciones necesarias es cuatro, para una precisión de 0.0001. Esta precisión es la misma que se ha usado en todos los tests presentados en esta Tesis.

Este incremento de tiempo no puede considerarse elevado teniendo en cuenta que:

- Se trata de una red relativamente grande.
- No se han utilizado las técnicas del estado del arte en la eliminación hacia adelante teniéndose en cuenta que h_{ip} es un vector muy disperso, ya que no es el motivo de la presente Tesis, habiéndose usado el método de resolución existente en una librería estándar.
- El método propuesto se basa en la estimación *off-line* del parámetro, por lo que el tema de los tiempos utilizados en el procesamiento no es crucial.

6.10 Aplicación a la identificación de errores topológicos

Aunque el objeto del método propuesto es realizar la estimación de parámetros de redes en modo *off-line*, también puede ser válido para la identificación de errores topológicos.

Para subsanar los posibles problemas que puede plantear la identificación de los errores topológicos con el método propuesto se tiene que:

- Si se trata de una línea que se encuentra abierta, su admitancia vale 0 y como el método propone realizar la estimación como admitancias en lugar de como impedancias (Apartado 6.2) no se produce ninguna singularidad.
- La identificación de los errores topológicos debe realizarse en modo *on-line* para que sea útil y operativa. Además, en el caso de los errores topológicos, la solución buscada es del tipo *línea abierta - línea cerrada*. Con el método propuesto se ha observado que, cuando se utiliza un único estado para realizar la estimación, los resultados obtenidos del parámetro estimado también son buenos, siempre que exista cierto nivel de redundancia, aunque no tanto como cuando se utilizan varios estados simultáneamente (Apartado 6.3). Sin embargo, no se necesita gran precisión, sino solamente poder identificar si la línea se encuentra abierta o cerrada. Por todo ello, se puede realizar la estimación en modo *on-line* usando solamente un estado.

Una vez que se ha justificado la utilización del método propuesto, incluso para la identificación de errores topológicos, se va a proceder a presentar los resultados obtenidos.

Nudo inicial	Nudo final	B_{exacta}	B_{BD}	$B_{estimada}$
2	3	-4.781863	-4.686226	-4.816885
2	4	-5.115838	-5.013522	-5.084407
4	9	-1.797979	-1.762019	-1.794714
6	13	-6.102755	-5.980700	-6.055018
10	11	-4.402944	-4.314885	-4.349139

Tabla 6.8: Análisis topológico cuando se tiene información de que la línea se encuentra cerrada y realmente se encuentra cerrada.

Pueden darse diferentes posibilidades respecto a la información que se posee de la línea sospechosa y del estado en el que se encuentra realmente. Estas posibilidades son:

1. **Información de que la línea se encuentra cerrada y realmente se encuentra cerrada:** Este caso se reduce a la estimación del parámetro de una línea sospechosa y por lo tanto es el que se ha venido analizando hasta el momento. No tiene demasiado sentido su análisis desde el momento que se trata de que la información que se tiene y la supuesta coinciden.

A pesar de ello, en la Tabla 6.8 se muestran varios ejemplos de los resultados obtenidos al realizar la estimación de la susceptancia de la línea sospechosa en la red IEEE-14. En ella se representan los nudos inicial y final, el valor exacto de la susceptancia de dicha línea (el cual nunca se conoce), el valor que se posee de dicho parámetro en la base de datos (y que será el valor del que se parta, ya que se cree que la línea se encuentra cerrada) y el valor estimado.

Lógicamente, no se posee información de los flujos de potencia en ninguno de los extremos de la línea sospechosa y en la matriz de admitancias se encuentra incluido el valor que se posee en la base de datos de la citada línea. Dicho valor se ha supuesto que es un 2 % menor que el exacto, ya que el valor exacto, como se ha dicho anteriormente, nunca es conocido. Además, se ha considerado que las telemidas de las que se dispone son de clase 1.

Como cabía esperar, los resultados obtenidos en la tabla son coincidentes con los valores exactos de los parámetros sospechosos, ya que lo que se

Nudo inicial	Nudo final	$B_{estimada}$
2	3	-0.026544
2	4	0.013087
4	9	0.000511
6	13	0.049741
10	11	-0.115927

Tabla 6.9: Análisis topológico cuando se tiene información de que la línea se encuentra abierta y realmente se encuentra abierta.

ha hecho ha sido estimar el parámetro, que es uno de los objetivos de la presente Tesis.

2. **Información de que la línea se encuentra abierta y realmente se encuentra abierta:** Es similar al caso anterior y se reduce a la estimación del parámetro de una línea sospechosa. Al igual que en el caso anterior, la información que se posee y la supuesta coinciden, por lo que no se puede presuponer que exista un error topológico.

De todas formas, en la Tabla 6.9 se representan varios ejemplos de los resultados obtenidos al realizar la estimación. En este caso, en la matriz de admitancias tanto la susceptancia como la conductancia y la capacitancia shunt valen 0, siendo también la clase de las telemedidas 1.

Los resultados obtenidos muestran claramente que, en todos los casos, la línea se encuentra abierta.

3. **Información de que la línea se encuentra cerrada y realmente se encuentra abierta:** Este caso sí es propio de procesarse para averiguar cuál es el estado real de dicha línea. No se posee información de los flujos de potencia en ninguno de los extremos de la línea sospechosa y el valor que se posee en la base de datos es el que se ha incluido en la matriz de admitancias. Dicho valor, al igual que anteriormente, se ha supuesto que es un 2 % menor que el exacto. Por último, se ha considerado que las medidas de las que se dispone son de clase 1.

Con estas premisas se ha procedido a realizar la estimación de la susceptancia de la línea dudosa, permaneciendo invariante tanto la conductancia como la capacitancia *shunt*. Se han realizado varias pruebas con

Nudo inicial	Nudo final	$B_{\text{línea cerrada}}$	B_{BD}	B_{estimada}
2	3	-4.781863	-4.686226	-1.153767
2	4	-5.115838	-5.013522	-1.046902
4	9	-1.797979	-1.762019	0.000511
6	13	-6.102755	-5.980700	-0.866474
10	11	-4.402944	-4.314885	-1.090201

Tabla 6.10: Análisis topológico cuando se tiene información de que la línea se encuentra cerrada y realmente se encuentra abierta.

la red IEEE-14 obteniéndose los valores indicados en la Tabla 6.10. En ella se presentan los nudos inicial y final de la línea sospechosa, el valor exacto de la susceptancia como si estuviese cerrada la línea, el valor que se posee de dicho parámetro en la base de datos (y que será el valor del que se parta, ya que se cree que la línea se encuentra cerrada) y el valor estimado.

De los resultados obtenidos en dicha tabla se deduce que en todos los casos se ha identificado correctamente que la línea se encuentra realmente abierta en contra de la suposición de partida de que se encontraba cerrada.

- 4. Información de que la línea se encuentra abierta y realmente se encuentra cerrada:** Este caso, al igual que el anterior, sí es propio de la identificación de errores topológicos. En estas circunstancias, al poseer información de que la línea se encuentra abierta, no se tiene ninguna medida de dicha línea, es decir, no se tiene información de los flujos de potencia en ella en ninguno de los extremos, y además en la matriz de admitancias todos los valores de dicha línea son 0.

En la Tabla 6.11 se muestran, al igual que en los casos anteriores, varios ejemplos realizados en la red IEEE-14, representándose los nudos inicial y final, el valor de la susceptancia exacta y el de la estimada.

Al igual que en los casos anteriores, los resultados obtenidos son plenamente satisfactorios, obteniéndose como resultado que la línea sospechosa se encuentra realmente cerrada cuando en principio se suponía que se encontraba abierta.

Nudo inicial	Nudo final	B_{exacta}	$B_{estimada}$
2	3	-4.781863	-3.652530
2	4	-5.115838	-4.021191
4	9	-1.797979	-1.794714
6	13	-6.102755	-5.194136
10	11	-4.402944	-4.242196

Tabla 6.11: Análisis topológico cuando se tiene información de que la línea se encuentra abierta y realmente se encuentra cerrada.

Hay que volver a resaltar el hecho de que en este caso no se estaba buscando la estimación del parámetro, sino el análisis topológico de la línea sospechosa, por lo que es lógico que en los dos últimos casos estudiados no se hayan producido unos resultados con la exactitud de los obtenidos en el resto de la Tesis. Esto es debido a que:

- Solamente se ha utilizado un estado en la estimación realizada.
- No se disponía de datos de flujos de potencia en la línea sospechosa, siendo los flujos los que más información proporcionan en la estimación de parámetros como ya se ha mencionado (Sección 4.6).
- La matriz de admitancias considerada tenía como fijos (y por lo tanto no se estimaban) la conductancia y la capacitancia *shunt*, siendo además sus valores contrarios a los que verdaderamente existían.
- Al tratarse la identificación de errores topológicos de un proceso en el que la solución buscada es del tipo *línea abierta - línea cerrada* no es importante la exactitud del parámetro obtenido.

6.11 Resumen

En este capítulo se han presentado los resultados experimentales obtenidos de la aplicación del método de estimación de parámetros propuesto en el Capítulo 5.

Dichos resultados se han obtenido utilizando la red IEEE-14 como si se tratase de una subred de la IEEE-118 en la que se encontrasen las líneas

sospechosas objeto de estudio. Además, y al igual que se hizo en el Capítulo 4, para que los resultados puedan considerarse válidos desde un punto de vista estadístico se han utilizado para cada uno de los puntos considerados en cada una de las curvas representadas la media de sesenta estimaciones diferentes.

Lo primero que se ha hecho en este capítulo ha sido justificar la utilización de los parámetros de las líneas sospechosas como admitancias con objeto de realizar una menor manipulación de las ecuaciones y evitar las posibles singularidades que pudieran presentarse al considerar dichas líneas abiertas (Apartado 6.2).

En el Epígrafe 6.3 se ha analizado la influencia del número de muestras usadas, habiéndose obtenido como resultados que:

- A medida que aumenta el número de estados procesados simultáneamente la estimación realizada es mejor.
- Los estados estimados son insensibles a los errores en los parámetros.

Seguidamente, en el Apartado 6.4, se han estudiado los resultados obtenidos teniendo en cuenta el nivel de error en las medidas, concluyéndose que:

- El error del parámetro estimado es proporcional al error medio del conjunto de medidas.
- La relación entre el error medio de las medidas y el error del parámetro estimado sólo es función del nivel de redundancia de dichas telemedidas.

además de las conclusiones del Epígrafe 6.3.

A continuación, al estudiar la influencia del tipo de medidas disponibles (Apartado 6.5), se ha obtenido que las medidas de inyecciones de potencia no son las adecuadas para realizar una buena estimación, ya que son menos sensibles a los errores en los parámetros que las medidas de flujos.

En el caso de que existan varios parámetros sospechosos, éstos pueden estimarse conjuntamente, obteniéndose unos resultados que son tan buenos como los obtenidos cuando sólo se estimaba un único parámetro (Sección 6.6).

En los Apartados 6.7 y 6.8 se han obtenido unos resultados sumamente interesantes:

- Para un conjunto de medidas con un determinado nivel de error, los valores de los parámetros estimados son los mismos independientemente del valor de partida de dicho parámetro.

- Los parámetros estimados son óptimos para un determinado nivel de ruido y para una redundancia de las medidas utilizadas. Esto es debido al hecho de no haber utilizado la información previa existente sobre el parámetro y, por lo tanto, estimarse el parámetro de acuerdo con la información proporcionada por las telemidas que se poseen.
- No se obtiene ninguna mejora si se utiliza el estimador con los parámetros que previamente se hayan estimado, si se tiene la misma redundancia y se dispone de telemidas con el mismo nivel de error.

En la Sección 6.9 se han mostrado resultados experimentales sobre el coste computacional del método, llegándose a la conclusión de que no es demasiado elevado en comparación con el beneficio obtenido y teniendo en cuenta que el método propuesto se basa en un procesamiento *off-line*.

Por último, en el Apartado 6.10 se ha propuesto un método para la identificación de errores topológicos utilizando el descrito para la estimación de parámetros. Para ello, se realiza la estimación con un único estado, con lo que se puede realizar en modo *on-line*.

Capítulo 7

Conclusiones y Líneas Futuras de Investigación

7.1 Resumen y conclusiones

En esta Tesis se han analizado ampliamente los efectos que los errores en los parámetros producen sobre los resultados del estimador de estado, con lo que se ha podido comprobar la necesidad de que los modernos centros de control cuenten con un estimador de parámetros que elimine dichos errores.

Además, se ha mostrado un método para organizar los cálculos utilizando simultáneamente varios estados diferentes, de manera que se puedan estimar uno o varios parámetros.

En el Capítulo 2 se ha realizado un resumen amplio de la estimación de estado, dando un repaso a los datos necesarios para poder realizarla así como a los resultados que se obtienen de ella. Además, se han tratado someramente la observabilidad y la detección de errores no gaussianos como dos de los aspectos relacionados con la estimación de estado.

En el Capítulo 3 se ha realizado un resumen del estado del arte de la identificación y estimación de parámetros. Para ello, primeramente se han expuesto las clasificaciones que existen hasta el momento y se ha propuesto una nueva que resalta la diferencia más significativa de cada uno de los métodos que hasta el día de hoy se han utilizado. Dicha diferencia característica es la ampliación o no del vector de estado mediante la introducción de los parámetros erróneos como variables adicionales.

La clasificación propuesta ha sido:

- Métodos que no amplían el vector de estado:

- Utilización de residuos.
- Métodos que amplían el vector de estado:
 - Resolución mediante ecuaciones normales.
 - Resolución mediante filtro de Kalman.

Seguidamente, y basándose en dicha clasificación, se han analizado los pros y contras de cada uno de los métodos, finalizándose dicho capítulo con el estudio de la identificación de errores topológicos como uno de los aspectos relacionados con la estimación de parámetros.

A continuación se ha estudiado la influencia que los errores en los parámetros tienen sobre la estimación de estado, cubriéndose de esta manera uno de los objetivos de la Tesis. Esto se ha desarrollado en el Capítulo 4, en el que se han analizado los factores que tienen más importancia y que ha permitido enfocar posteriormente el problema.

Entre dichas conclusiones, se ha obtenido que:

- El deterioro producido sobre las medidas estimadas, sobre todo las adyacentes, aumenta notablemente a medida que el error en el parámetro crece.
- Cuanto más exactas son las medidas de las que se dispone, los errores en los parámetros tienen mayor influencia sobre las medidas estimadas.
- Los errores en la conductancia son menos significativos que los de la susceptancia. Esta conclusión ha permitido considerar que los parámetros son invariables con el tiempo.
- La influencia del parámetro erróneo sobre las medidas estimadas es mucho mayor cuando se dispone de medidas de flujos de potencia que cuando se dispone de medidas de inyección, siendo en este último caso los errores en las medidas casi independientes de los errores de los parámetros.
- La influencia sobre las medidas de tensión es similar al comportamiento descrito anteriormente. Si sólo son erróneas las medidas de inyección, la influencia del parámetro disminuye a medida que el error de partida de dichas medidas lo hace, mientras que si las únicas medidas erróneas son las de flujo, la influencia es independiente del error de partida de dichas medidas.

El otro objetivo marcado en esta Tesis se ha desarrollado en el Capítulo 5. En él se han presentado las ventajas e inconvenientes de la estimación *off-line* frente a la *on-line*, justificándose el uso de la estimación *off-line*. Es por ello por lo que se pueden utilizar los datos históricos de medidas para estimar parámetros con el método propuesto.

En este capítulo, y antes de pasar a la descripción del método, se ha demostrado que es mejor no incluir la información previa existente sobre el parámetro, ya que si se introdujera sería necesario asignar al parámetro un factor de peso que podría provocar una estimación de él peor que el valor que ya se poseía. Dicha conclusión no es trivial y ha sido fundamental para el método de resolución empleado.

Seguidamente se ha explicado el método propuesto, el cual se basa en la utilización de varias estimaciones simultáneamente, ya que lo único invariante en todas ellas son los parámetros que se estiman. El método, resumidamente, lo que hace es:

- Aumentar el vector de estado con los parámetros sospechosos.
- Procesar muestras de diferentes momentos simultáneamente con objeto de aumentar la redundancia alrededor de los parámetros erróneos.

A continuación se ha justificado el carácter local que tiene la estimación de parámetros.

Para finalizar, en el Capítulo 6 se ha justificado experimentalmente el método propuesto, obteniéndose las siguientes conclusiones:

- A medida que aumenta el número de estados procesados simultáneamente la estimación realizada es mejor.
- Los estados estimados con el método propuesto son insensibles a los errores en los parámetros.
- El error del parámetro estimado es proporcional al error medio del conjunto de medidas.
- La relación entre el error medio de las medidas y el error del parámetro estimado sólo es función del nivel de redundancia de dichas telemedidas.
- Las medidas de inyecciones de potencia no son las adecuadas para realizar una buena estimación.

- El método es válido para la estimación de uno o varios parámetros simultáneamente, siempre que la redundancia sea adecuada.
- Para un conjunto de medidas con un determinado nivel de error, los valores de los parámetros estimados son los mismos independientemente del valor de partida de dicho parámetro.
- Los parámetros estimados son óptimos para un determinado nivel de ruido y para una redundancia de las medidas utilizadas.
- No se obtiene ninguna mejora del parámetro si se utiliza el estimador con los parámetros que previamente se hayan estimado, si se tiene la misma redundancia y se dispone de telemidas con el mismo nivel de error.

Por último, se ha estudiado el coste computacional del método propuesto y, como resultado colateral, se ha propuesto un método para la identificación de errores topológicos utilizando el descrito para la estimación de parámetros. Para ello, se ha realizado la estimación con un único estado, con lo que ya se puede realizar en modo *on-line*.

7.2 Sugerencias para futuras líneas de investigación

A partir de los resultados obtenidos en la presente Tesis se pueden sugerir varias líneas de investigación futuras:

- Uno de los principales problemas con los que se enfrenta toda estimación de estado es la asignación del factor de peso a cada una de las medidas, por lo que la estimación de dicho factor es algo de suma importancia y que puede ser abordado.
- La solución de las ecuaciones utilizadas en el método propuesto puede realizarse de un modo más eficiente usando las técnicas del estado del arte, con lo que los tiempos necesarios para realizar los cálculos se reducirían sensiblemente.
- El método y la sistemática propuestos para la identificación de errores topológicos han surgido como ramas colaterales de la estimación de parámetros que ha sido, realmente, uno de los objetivos de la presente Tesis.

Por ello, pueden y deben ser mejorados de manera que se optimice la forma de realizar dicha identificación.

Apéndice A

Solución Numérica de la Estimación de Estado

A.1 Introducción

En este apéndice se estudian diversos métodos propuestos para resolver el problema del mal condicionamiento que se presenta en la estimación de estado. Los métodos que se van a analizar son:

- Ecuaciones normales con restricciones [15, 99].
- Transformaciones ortogonales [82, 83, 97].
- Método híbrido [66].
- Método de la matriz aumentada de Hachtel [38, 56, 100].
- Método de pseudoinversas o de Peters y Wilkinson [18, 25, 44, 75].
- Método de la matriz aumentada por bloques [10, 74].

A.2 Ecuaciones normales con restricciones

En el caso de existir medidas virtuales, las cuales representan relaciones matemáticas exactas, se pueden incorporar directamente en la formulación de la estimación de mínimos cuadrados asignándoles un factor de peso elevado, pero como se dijo en el Apartado 2.3 se ha observado empíricamente que tal disparidad en los factores de peso puede causar un mal condicionamiento.

Por ello, lo que se hace es proceder a la división del conjunto de medidas en:

$$\begin{aligned} \text{Telemidas:} & \quad z = h(x) + \nu \\ \text{Medidas virtuales:} & \quad c(x) = 0 \end{aligned} \quad (\text{A.1})$$

por lo que la matriz jacobiano se divide en H y C siendo ahora H la submatriz jacobiano de las telemidas solamente y C la de medidas virtuales. Si k es la relación entre los factores de peso de las medidas virtuales y las telemidas, entonces, de las ecuaciones normales (2.19) obtenemos

$$\begin{bmatrix} H \\ C \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} 1 & \\ & k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H \\ C \end{bmatrix} \Delta x = \begin{bmatrix} H \\ C \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} 1 & \\ & k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta z \\ \Delta c \end{bmatrix} \quad (\text{A.2})$$

siendo $\Delta c = -c(x)$.

Para valores de k muy elevados, el término $kC^T C$ es dominante en la matriz, sin embargo, no suele haber suficientes medidas virtuales como para que la matriz C sea de rango completo y por tanto sea observable la red. Por lo tanto, para valores de k grandes, la matriz de coeficientes en (A.2) tiende a ser singular causando problemas de mal condicionamiento.

Para evitar este problema las medidas virtuales se pueden separar de las telemidas tratándose como restricciones de igualdad y las medidas z incluirán solamente las telemidas y las pseudomedidas, si hay alguna. El problema que se plantea en este caso será el de encontrar un estimado del vector de estado x que minimice la función objetivo (2.11) satisfaciendo, además, las restricciones $c(x) = 0$.

Para resolver este problema de minimización con restricciones [15, 99] se puede utilizar el método de los multiplicadores de Lagrange, obteniéndose el estimado \hat{x} mediante un procedimiento iterativo en el que la ecuación linealizada que se resuelve en cada iteración es:

$$\begin{bmatrix} H^T W H & C^T \\ C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H^T W \Delta z \\ \Delta c \end{bmatrix} \quad (\text{A.3})$$

Siendo

$$F = \begin{bmatrix} H^T W H(x) & C^T \\ C & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{A.4})$$

se realiza la factorización triangular

$$F = U^T U \quad (\text{A.5})$$

y mediante eliminación hacia adelante y sustitución hacia atrás de

$$(U^T U) \begin{bmatrix} \Delta x \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H^T(x)W\Delta z \\ \Delta c \end{bmatrix} \quad (\text{A.6})$$

se obtiene Δx .

A.3 Transformaciones ortogonales

La función objetivo del problema de mínimos cuadrados en cada iteración es:

$$\begin{aligned} J(\Delta x) &= (\Delta z - H\Delta x)^T W (\Delta z - H\Delta x) \\ &= (\Delta \tilde{z} - \tilde{H}\Delta x)^T (\Delta \tilde{z} - \tilde{H}\Delta x) \\ &= \|\Delta \tilde{z} - \tilde{H}\Delta x\|^2 \end{aligned} \quad (\text{A.7})$$

donde

$$\tilde{H} = W^{1/2}H \quad (\text{A.8})$$

$$\Delta \tilde{z} = W^{1/2}\Delta z \quad (\text{A.9})$$

Sea Q una matriz ortogonal, es decir $Q^T Q = I$, tal que

$$\tilde{H} = Q^T \begin{bmatrix} U \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{A.10})$$

Entonces se tiene:

$$\begin{aligned} J(\Delta x) &= (\Delta \tilde{z} - \tilde{H}\Delta x)^T Q^T Q (\Delta \tilde{z} - \tilde{H}\Delta x) \\ &= \|Q\Delta \tilde{z} - Q\tilde{H}\Delta x\|^2 \\ &= \|\Delta y_1 - U\Delta x\|^2 + \|\Delta y_2\|^2 \end{aligned} \quad (\text{A.11})$$

donde

$$\begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \end{bmatrix} \Delta \tilde{z} = \begin{bmatrix} \Delta y_1 \\ \Delta y_2 \end{bmatrix} \quad (\text{A.12})$$

El mínimo de (A.11) ocurre cuando

$$U\Delta x = \Delta y_1 \quad (\text{A.13})$$

es decir

$$U\Delta x = Q_1 W^{1/2}\Delta z \quad (\text{A.14})$$

y de esta ecuación, mediante resolución hacia atrás, se obtiene Δx .

Resumiendo, el método comienza realizando las transformaciones ortogonales (A.10) y (A.12) de \tilde{H} y $\Delta \tilde{z}$ y a continuación se resuelve (A.13) mediante sustitución hacia atrás. De esta manera se evita tener que construir G , pero Q es más densa. Para la obtención de Q se utiliza la transformación de Givens.

A.4 Método híbrido

Teniendo en cuenta (A.10) se obtiene:

$$G = H^T W H = \tilde{H}^T \tilde{H} = U^T Q Q^T U = U^T U \quad (\text{A.15})$$

El método híbrido resuelve las ecuaciones normales utilizando

$$U^T U \Delta x = H^T W \Delta z \quad (\text{A.16})$$

Los puntos principales de este método son la transformación ortogonal (A.10) de \tilde{H} , con lo que se evita la necesidad de utilizar G , y la resolución de las ecuaciones normales (A.16) mediante eliminación hacia adelante y sustitución hacia atrás sin necesidad de tener que almacenar Q [42].

A.5 Método de la matriz aumentada de Hachtel

Para la resolución del problema de minimización con restricciones de \hat{x} se utiliza el método de la matriz aumentada de Hachtel en el que las ecuaciones se aumentan con el vector de residuos y se resuelven en cada iteración las siguientes ecuaciones:

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & C \\ 0 & \alpha W^{-1} & H \\ C^T & H^T & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\alpha^{-1} \lambda \\ \alpha^{-1} W \Delta r \\ \Delta x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta c \\ \Delta z \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{A.17})$$

siendo:

$$\Delta r = \Delta z - H \Delta x \quad (\text{A.18})$$

λ es el multiplicador de Lagrange y α es un parámetro utilizado para controlar la estabilidad numérica del problema [81].

Las variables que se calculan en cada iteración son, además de Δx :

$$\lambda' = -\alpha^{-1}\lambda \quad (\text{A.19})$$

$$\Delta r' = \alpha^{-1}W\Delta r \quad (\text{A.20})$$

$$(\text{A.21})$$

Definiendo

$$K(x) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & C \\ 0 & \alpha W^{-1} & H \\ C^T & H^T & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{A.22})$$

se realiza la factorización triangular

$$K = U^T U \quad (\text{A.23})$$

y mediante eliminación hacia adelante y sustitución hacia atrás de

$$(U^T U) \begin{bmatrix} \lambda' \\ \Delta r' \\ \Delta x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta c \\ \Delta z \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{A.24})$$

se obtienen las correcciones.

En el caso particular de que no existan restricciones de igualdad las ecuaciones a resolver son:

$$\begin{bmatrix} \alpha W^{-1} & H \\ H^T & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha^{-1}W\Delta r \\ \Delta x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta z \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{A.25})$$

Este método tiene el inconveniente de destruir la simetría de la matriz debido a los pivotamientos.

A.6 Método de pseudoinversas

Este método, también llamado de Peters y Wilkinson, realiza la minimización del error de mínimos cuadrados mediante la siguiente transformación del problema original:

$$\tilde{H} = W^{-1/2}H \quad (\text{A.26})$$

$$\Delta \tilde{z} = W^{-1/2}\Delta z \quad (\text{A.27})$$

con lo que el problema se reduce a:

$$\text{minimizar } J(x) = \tilde{r}^t \tilde{r} \quad (\text{A.28})$$

siendo

$$\tilde{r} = \tilde{H} \Delta x - \Delta \tilde{z} \quad (\text{A.29})$$

Factorizando \tilde{H} de manera que:

$$\tilde{H} = LU \quad (\text{A.30})$$

siendo L una matriz trapezoidal inferior y U una matriz triangular superior, y definiendo:

$$y = U \Delta x \quad (\text{A.31})$$

el problema se reduce a:

$$\begin{aligned} &\text{minimizar} && \tilde{r}^t \tilde{r} \\ &\text{sujeto a:} && \tilde{r} = Ly - \Delta \tilde{z} \end{aligned} \quad (\text{A.32})$$

De este problema transformado se obtiene y de la ecuación:

$$[L^T L] y = L^T \Delta \tilde{z} \quad (\text{A.33})$$

no siendo $L^T L$ tan mal condicionado como G y obteniéndose la solución del problema original mediante la resolución del sistema triangular superior de ecuaciones:

$$U \Delta x = y \quad (\text{A.34})$$

La resolución con restricciones [25] se puede expresar como:

$$\begin{bmatrix} C \\ \tilde{H} \end{bmatrix} \Delta x = \begin{bmatrix} \Delta c \\ \Delta \tilde{z} \end{bmatrix} \quad (\text{A.35})$$

realizándose la misma factorización que en el método sin restricciones. Se crea una matriz triangular superior U no singular y una trapezoidal inferior L , teniendo ésta la siguiente estructura:

$$\begin{bmatrix} L_{11} & 0 \\ L_{21} & L_{22} \end{bmatrix} \quad (\text{A.36})$$

La resolución se realiza calculando previamente una variable intermedia w de $L_{11} w = \Delta c$ mediante eliminación hacia adelante. Seguidamente se obtiene otra variable intermedia y de:

$$L_{22}^T L_{22} y = L_{22}^T \Delta \tilde{z} \quad (\text{A.37})$$

mediante factorización dispersa. Por último se resuelve:

$$U\Delta x = \begin{bmatrix} w \\ y \end{bmatrix} \quad (\text{A.38})$$

y se obtiene Δx mediante sustitución hacia atrás.

A.7 Método de la matriz aumentada por bloques

La idea básica de este método se basa en organizar la formulación del método de la matriz aumentada de Hachtel como una submatriz con estructura de bloques que se ajuste a la forma de la matriz de incidencias de la red y de esta manera queda como una matriz dispersa.

Toda la información asociada a las medidas se agrupa en flujos, incluyendo tensiones, e inyecciones eliminándose toda formulación explícita de los flujos en la resolución del sistema. Las únicas restricciones que se consideran están asociadas a inyecciones y todas ellas son, por tanto, informaciones nodales.

Separando en (A.17) la información en inyección (subíndice i) o de flujo y tensiones (subíndice f) y haciendo $\alpha = 1$ por claridad, se obtiene:

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & C \\ 0 & W_i^{-1} & 0 & H_i \\ 0 & 0 & W_f^{-1} & H_f \\ C^T & H_i^T & H_f^T & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\lambda \\ W_i\Delta r_i \\ W_f\Delta r_f \\ \Delta x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta c \\ \Delta z_i \\ \Delta z_f \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{A.39})$$

Seguidamente, permutando en la matriz de información las filas y las columnas que involucran a las restricciones y eliminando de ella H_f^T :

$$\left[\begin{array}{c|ccc} W_f^{-1} & 0 & 0 & H_f \\ \hline 0 & W_i^{-1} & 0 & H_i \\ 0 & 0 & 0 & C \\ H_f^T & H_i^T & C^T & -H_f^T W_f H_f \end{array} \right] \begin{bmatrix} W_f\Delta r_f \\ W_i\Delta r_i \\ -\lambda \\ \Delta x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta z_f \\ \Delta z_i \\ \Delta c \\ -H_f^T W_f \Delta z_f \end{bmatrix} \quad (\text{A.40})$$

En (A.40) se observa que la ecuación asociada a los residuos de las medidas de flujos queda desacoplada del resto del sistema, por lo que la ecuación matricial que se ha de resolver es:

$$\begin{bmatrix} W_i^{-1} & 0 & H_i \\ 0 & 0 & C \\ H_i^T & C^T & -H_f^T W_f H_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W_i\Delta r_i \\ -\lambda \\ \Delta x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta z_i \\ \Delta c \\ -H_f^T W_f \Delta z_f \end{bmatrix} \quad (\text{A.41})$$

La idea de reordenar este sistema de ecuaciones con objeto de obtener una estructura particionada en bloques de manera que resulte fácil de factorizar ha sido desarrollada en [91] y la razón es evitar la utilización de rutinas especiales que almacenen los pivotes pequeños o nulos necesarios para realizar una eliminación eficiente y estable.

El modelo de (A.41) tiene una estructura intermedia entre (A.3) y (A.17), siendo $H_f^T W_f H_f$ un subconjunto de la matriz de admitancia nodal y estando todas las variables de (A.41) relacionadas con los nodos de la red. El siguiente paso se basa en realizar las necesarias permutaciones de filas y columnas de manera que estén agrupadas todas las variables de un mismo nodo [41].

Apéndice B

Propiedades Estadísticas de la Estimación de Mínimos Cuadrados

B.1 Introducción

En el Capítulo 2 se enumeraron las propiedades deseables que un estimador debía tener y que, en concreto, el estimado de máxima verosimilitud poseía.

En el presente apéndice se van a enumerar las propiedades estadísticas que posee la estimación de mínimos cuadrados.

B.2 Propiedades estadísticas

Siendo z el conjunto de telemidas, x el vector de variables de estado (tensiones en los nudos y fase de los ángulos), h las ecuaciones que relacionan las medidas con las variables de estado y ν el vector de errores de las medidas tal y como se vio en el Epígrafe 2.3, el vector de medidas se modela según la ecuación (2.7):

$$z = h(x) + \nu \tag{B.1}$$

Se supone que los errores $\nu_1, \nu_2, \dots, \nu_m$ son variables aleatorias independientes con distribución gaussiana y media cero, siendo R la matriz de covarianzas

de errores de las medidas:

$$R = E(\nu\nu^T) = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & & & \\ & \sigma_2^2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & \sigma_m^2 \end{bmatrix} \quad (\text{B.2})$$

Además, y tal y como se definió en el Capítulo 2, \hat{x} es el vector de variables de estado estimadas y $\hat{z} = h(\hat{x})$ es el vector de telemidas estimadas.

Una vez recordadas estas premisas, las propiedades estadísticas que posee la estimación de mínimos cuadrados son [39, 42]:

1. Es insesgada, por lo que las esperanzas matemáticas del estado y las telemidas estimadas son:

$$E(\hat{x}) = x \quad (\text{B.3})$$

$$E(\hat{z}) = E(z) = h(x) \quad (\text{B.4})$$

2. Las covarianzas de las variables de estado y de las telemidas estimadas caso de no existir ruidos son (Apartado 2.5.2):

$$\text{cov}(\hat{x}) = P_x = E[(\hat{x} - x)(\hat{x} - x)^T] = G^{-1} \quad (\text{B.5})$$

$$\text{cov}(\hat{z}) = HG^{-1}H^T \quad (\text{B.6})$$

3. La función objetivo $J(\hat{x})$ tiene la distribución de una χ^2 de $m - n$ grados de libertad, siendo además su esperanza matemática:

$$E[J(\hat{x})] = m - n \quad (\text{B.7})$$

donde m es el número de medidas de las que se dispone y $n = 2N - 1$, siendo N el número de nudos de la red.

4. Definiéndose el vector de residuos de las medidas tal y como se hizo en la Sección 2.5.2:

$$r = z - \hat{z} \quad (\text{B.8})$$

su esperanza matemática vale:

$$E(r) = 0 \quad (\text{B.9})$$

y su covarianza:

$$\text{cov}(r) = E(rr^T) = P_z = R - HG^{-1}H^T = (I - HG^{-1}H^T R^{-1})R = S_r R \quad (\text{B.10})$$

siendo S_r la matriz de sensibilidad residual.

Dicha matriz de sensibilidad residual permite hallar las medidas que son críticas, ya que una medida z_i es crítica si y sólo si la fila y la columna i -ésima de S_r es nula.

5. El vector de residuos normalizados r_N es:

$$r_{Ni} = \frac{r_i}{\sigma_i \sqrt{(S_r)_{ii}}} \quad (\text{B.11})$$

el cual tiene distribución gaussiana con media 0 y desviación típica 1 y los elementos $(S_r)_{ii}$ pueden ser calculados mediante técnicas de matrices dispersas como se describió en la Sección 2.5.2.

Apéndice C

Elementos de la Matriz Jacobiano

C.1 Introducción

En este apéndice se presentan los elementos que forman la matriz jacobiano, tanto los que habitualmente existen en cualquier estimación de estado [43], como los correspondientes a las nuevas columnas incluidas en la matriz al estimar los parámetros.

Estas nuevas columnas aparecen como consecuencia de considerar en el método propuesto el vector de estados ampliado con los parámetros sospechosos.

C.2 Elementos de la matriz

Siendo:

- V_i, V_j los módulos de las tensiones en los nudos i y j .
- θ_i el desfase del nudo i .
- θ_{ij} el desfase entre los nudos i y j .
- P_i, Q_i las inyecciones de potencia activa y reactiva en el nudo i respectivamente.
- P_{ij}, Q_{ij} los flujos de potencia activa y reactiva en la línea que une el nudo i y el j respectivamente.

- $G_{ij} + B_{ij}$ el elemento (i, j) de la matriz de admitancias de nudos.
- B_{ij}^c la admitancia *shunt* del modelo en π de la línea que une el nudo i con el j .
- G_{ij}^t la conductancia de la línea que une el nudo i con el j .
- B_{ij}^t la susceptancia de la línea que une el nudo i con el j .

los elementos que componen la matriz jacobiano son los siguientes:

- Elementos correspondientes a las tensiones:

$$\frac{\delta V_i}{\delta V_i} = 1 \quad (\text{C.1})$$

$$\frac{\delta V_i}{\delta V_j} = 0 \quad (\text{C.2})$$

$$\frac{\delta P_i}{\delta V_i} = \sum_{j=1}^N V_j (G_{ij} \cos(\theta_{ij}) + B_{ij} \text{sen}(\theta_{ij})) + V_i G_{ii} \quad (\text{C.3})$$

$$\frac{\delta P_i}{\delta V_j} = V_i (G_{ij} \cos(\theta_{ij}) + B_{ij} \text{sen}(\theta_{ij})) \quad (\text{C.4})$$

$$\frac{\delta Q_i}{\delta V_i} = \sum_{j=1}^N V_j (G_{ij} \text{sen}(\theta_{ij}) - B_{ij} \cos(\theta_{ij})) - V_i B_{ii} \quad (\text{C.5})$$

$$\frac{\delta Q_i}{\delta V_j} = V_i (G_{ij} \text{sen}(\theta_{ij}) - B_{ij} \cos(\theta_{ij})) \quad (\text{C.6})$$

$$\frac{\delta P_{ij}}{\delta V_i} = V_j (G_{ij} \cos(\theta_{ij}) + B_{ij} \text{sen}(\theta_{ij})) - 2 G_{ij} V_i \quad (\text{C.7})$$

$$\frac{\delta P_{ij}}{\delta V_j} = V_i (G_{ij} \cos(\theta_{ij}) + B_{ij} \text{sen}(\theta_{ij})) \quad (\text{C.8})$$

$$\frac{\delta Q_{ij}}{\delta V_i} = V_j (G_{ij} \text{sen}(\theta_{ij}) - B_{ij} \cos(\theta_{ij})) + 2 V_i (B_{ij} - B_{ij}^c) \quad (\text{C.9})$$

$$\frac{\delta Q_{ij}}{\delta V_j} = V_i (G_{ij} \text{sen}(\theta_{ij}) - B_{ij} \cos(\theta_{ij})) \quad (\text{C.10})$$

- Elementos correspondientes a los desfases:

$$\frac{\delta V_i}{\delta \theta_i} = 0 \quad (\text{C.11})$$

$$\frac{\delta V_i}{\delta \theta_j} = 0 \quad (\text{C.12})$$

$$\frac{\delta P_i}{\delta \theta_i} = \sum_{j=1}^N V_i V_j (-G_{ij} \text{sen}(\theta_{ij}) + B_{ij} \text{cos}(\theta_{ij})) - V_i^2 B_{ii} \quad (\text{C.13})$$

$$\frac{\delta P_i}{\delta \theta_j} = V_i V_j (G_{ij} \text{sen}(\theta_{ij}) - B_{ij} \text{cos}(\theta_{ij})) \quad (\text{C.14})$$

$$\frac{\delta Q_i}{\delta \theta_i} = \sum_{j=1}^N V_i V_j (G_{ij} \text{cos}(\theta_{ij}) + B_{ij} \text{sen}(\theta_{ij})) - V_i^2 G_{ii} \quad (\text{C.15})$$

$$\frac{\delta Q_i}{\delta \theta_j} = V_i V_j (-G_{ij} \text{cos}(\theta_{ij}) - B_{ij} \text{sen}(\theta_{ij})) \quad (\text{C.16})$$

$$\frac{\delta P_{ij}}{\delta \theta_i} = V_i V_j (-G_{ij} \text{sen}(\theta_{ij}) + B_{ij} \text{cos}(\theta_{ij})) \quad (\text{C.17})$$

$$\frac{\delta P_{ij}}{\delta \theta_j} = V_i V_j (G_{ij} \text{sen}(\theta_{ij}) - B_{ij} \text{cos}(\theta_{ij})) \quad (\text{C.18})$$

$$\frac{\delta Q_{ij}}{\delta \theta_i} = V_i V_j (G_{ij} \text{cos}(\theta_{ij}) + B_{ij} \text{sen}(\theta_{ij})) \quad (\text{C.19})$$

$$\frac{\delta Q_{ij}}{\delta \theta_j} = V_i V_j (-G_{ij} \text{cos}(\theta_{ij}) - B_{ij} \text{sen}(\theta_{ij})) \quad (\text{C.20})$$

- Elementos correspondientes a las susceptancias:

$$\frac{\delta V_i}{\delta B'_{ij}} = 0 \quad (\text{C.21})$$

$$\frac{\delta V_j}{\delta B'_{ij}} = 0 \quad (\text{C.22})$$

$$\frac{\delta P_i}{\delta B'_{ij}} = -V_i V_j \text{sen}(\theta_{ij}) \quad (\text{C.23})$$

$$\frac{\delta P_j}{\delta B'_{ij}} = -V_i V_j \text{sen}(\theta_{ji}) \quad (\text{C.24})$$

$$\frac{\delta Q_i}{\delta B'_{ij}} = V_i V_j \text{cos}(\theta_{ij}) - V_i^2 \quad (\text{C.25})$$

$$\frac{\delta Q_j}{\delta B'_{ij}} = V_i V_j \text{cos}(\theta_{ji}) - V_j^2 \quad (\text{C.26})$$

$$\frac{\delta P_{ij}}{\delta B'_{ij}} = -V_i V_j \text{sen}(\theta_{ij}) \quad (\text{C.27})$$

$$\frac{\delta P_{ji}}{\delta B'_{ij}} = -V_i V_j \text{sen}(\theta_{ji}) \quad (\text{C.28})$$

$$\frac{\delta Q_{ij}}{\delta B'_{ij}} = V_i V_j \text{cos}(\theta_{ij}) - V_i^2 \quad (\text{C.29})$$

$$\frac{\delta Q_{ji}}{\delta B'_{ij}} = V_i V_j \text{cos}(\theta_{ji}) - V_j^2 \quad (\text{C.30})$$

- Elementos correspondientes a las conductancias:

$$\frac{\delta V_i}{\delta G'_{ij}} = 0 \quad (\text{C.31})$$

$$\frac{\delta V_j}{\delta G'_{ij}} = 0 \quad (\text{C.32})$$

$$\frac{\delta P_i}{\delta G'_{ij}} = -V_i V_j \text{cos}(\theta_{ij}) + V_i^2 \quad (\text{C.33})$$

$$\frac{\delta P_j}{\delta G'_{ij}} = -V_i V_j \text{cos}(\theta_{ji}) + V_j^2 \quad (\text{C.34})$$

$$\frac{\delta Q_i}{\delta G'_{ij}} = -V_i V_j \text{sen}(\theta_{ij}) \quad (\text{C.35})$$

$$\frac{\delta Q_j}{\delta G'_{ij}} = -V_i V_j \text{sen}(\theta_{ji}) \quad (\text{C.36})$$

$$\frac{\delta P_{ij}}{\delta G'_{ij}} = -V_i V_j \text{cos}(\theta_{ij}) + V_i^2 \quad (\text{C.37})$$

$$\frac{\delta P_{ji}}{\delta G'_{ij}} = -V_i V_j \text{cos}(\theta_{ji}) + V_j^2 \quad (\text{C.38})$$

$$\frac{\delta Q_{ij}}{\delta G'_{ij}} = -V_i V_j \text{sen}(\theta_{ij}) \quad (\text{C.39})$$

$$\frac{\delta Q_{ji}}{\delta G'_{ij}} = -V_i V_j \text{sen}(\theta_{ji}) \quad (\text{C.40})$$

Apéndice D

Fondos de Escala Utilizados en el Entorno de Simulación

D.1 Introducción

Los fondos de escala utilizados en las simulaciones dependen de los valores máximos esperados en cada punto de medida. Además, se han agrupado los valores en torno a varios de ellos con objeto de disminuir la diversidad de valores utilizados.

Con estas premisas, en este apéndice se presentan los fondos de escala considerados para las inyecciones en los nudos y los flujos en las ramas, en por unidad, sobre una base de 100 MVA y siendo válidos los valores de flujos de potencia para ambos extremos de la línea.

D.2 Fondos de escala de la red IEEE-14

La Tabla D.1 muestra los fondos de escala considerados para las inyecciones en los nudos y la D.2 los de los flujos en las ramas.

Nudo	Inyección activa	Inyección reactiva
1	2.80	0.20
2	0.70	0.65
3	1.15	0.40
4	0.70	0.95
5	0.25	0.40
6	0.60	0.65
7	0.10	0.20
8	0.10	0.40
9	0.60	0.20
10	0.25	0.10
11	0.10	0.10
12	0.10	0.10
13	0.25	0.20
14	0.25	0.20

Tabla D.1: Fondos de escala considerados para los nudos de la red IEEE-14 en por unidad y sobre una base de 100 MVA.

Nudo inicial	Nudo final	Flujo de activa	Flujo de reactiva
1	2	2.00	0.35
2	3	1.00	0.20
2	4	1.00	0.20
1	5	1.00	0.20
2	5	0.65	0.20
3	4	0.65	0.20
4	5	1.00	0.35
5	6	0.65	0.35
4	7	0.65	0.35
7	8	0.20	0.35
4	9	0.65	0.20
7	9	0.65	0.20
9	10	0.20	0.10
6	11	0.25	0.20
6	12	0.20	0.10
6	13	0.25	0.20
9	14	0.20	0.10
10	11	0.20	0.10
12	13	0.20	0.10
13	14	0.20	0.10

Tabla D.2: Fondos de escala considerados para las ramas de la red IEEE-14 en por unidad y sobre una base de 100 MVA.

D.3 Fondos de escala de la red IEEE-118

Las Tablas D.3 - D.6 muestran los fondos de escala considerados para las inyecciones en los nudos, mientras que las D.7 - D.15 muestran los de los flujos en las ramas.

Nudo	Inyección activa	Inyección reactiva
1	0.80	0.40
2	0.25	0.20
3	0.50	0.20
4	0.50	0.40
5	0.10	0.40
6	0.80	0.10
7	0.25	0.10
8	0.50	0.60
9	0.10	0.10
10	6.00	0.80
11	1.20	0.40
12	0.50	1.20
13	0.50	0.20
14	0.25	0.10
15	1.20	0.40
16	0.50	0.20
17	0.10	1.20
18	0.80	0.40
19	0.80	0.40
20	0.25	0.10
21	0.25	0.10
22	0.25	0.10
23	0.10	0.10
24	0.25	0.40
25	4.00	2.10
26	4.00	1.20
27	1.20	0.40
28	0.25	0.10
29	0.50	0.10
30	0.25	1.20

Tabla D.3: Fondos de escala considerados para los nudos de la red IEEE-118 en por unidad y sobre una base de 100 MVA.

Nudo	Inyección activa	Inyección reactiva
31	0.50	0.20
32	0.80	0.40
33	0.50	0.20
34	0.80	0.40
35	0.50	0.20
36	0.50	0.40
37	0.25	2.10
38	0.25	2.10
39	0.50	0.20
40	0.80	0.40
41	0.50	0.20
42	1.20	0.60
43	0.25	0.10
44	0.25	0.10
45	0.80	0.20
46	0.25	0.20
47	0.50	0.10
48	0.25	0.10
49	2.00	1.20
50	0.25	0.10
51	0.25	0.10
52	0.25	0.10
53	0.50	0.20
54	1.20	0.40
55	1.20	0.40
56	1.20	0.20
57	0.25	0.10
58	0.25	0.10
59	2.00	0.80
60	1.20	0.10

Tabla D.4: Fondos de escala considerados para los nudos de la red IEEE-118 en por unidad y sobre una base de 100 MVA (continuación).

Nudo	Inyección activa	Inyección reactiva
61	2.00	0.20
62	1.20	0.20
63	0.10	1.20
64	0.10	0.60
65	6.00	2.10
66	6.00	2.10
67	0.50	0.10
68	0.10	2.10
69	6.00	1.20
70	1.20	0.40
71	0.10	0.10
72	0.25	0.20
73	0.10	0.10
74	1.20	0.40
75	0.80	0.20
76	1.20	0.40
77	0.80	0.60
78	1.20	0.40
79	0.50	0.20
80	6.00	2.80
81	0.10	2.10
82	0.80	0.20
83	0.25	0.10
84	0.25	0.10
85	0.50	0.40
86	0.50	0.20
87	0.10	0.20
88	0.80	0.20
89	8.00	0.40
90	2.00	0.60

Tabla D.5: Fondos de escala considerados para los nudos de la red IEEE-118 en por unidad y sobre una base de 100 MVA (continuación).

Nudo	Inyección activa	Inyección reactiva
91	0.25	0.20
92	1.20	0.10
93	0.25	0.10
94	0.50	0.20
95	0.80	0.40
96	0.80	0.20
97	0.25	0.20
98	0.50	0.10
99	0.50	0.20
100	4.00	2.10
101	0.50	0.20
102	0.10	0.10
103	0.25	0.40
104	0.50	0.40
105	0.50	0.20
106	0.80	0.20
107	0.80	0.10
108	0.10	0.10
109	0.10	0.10
110	0.50	0.40
111	0.50	0.10
112	0.80	0.40
113	0.10	0.10
114	0.10	0.10
115	0.50	0.10
116	2.00	0.60
117	0.25	0.10
118	0.50	0.20

Tabla D.6: Fondos de escala considerados para los nudos de la red IEEE-118 en por unidad y sobre una base de 100 MVA (continuación).

Nudo inicial	Nudo final	Flujo de activa	Flujo de reactiva
1	2	0.25	0.20
1	3	0.60	0.20
2	12	0.60	0.40
3	5	1.20	0.20
3	12	0.25	0.20
4	5	2.00	0.40
4	11	1.20	0.10
5	6	1.20	0.10
8	5	6.00	0.80
5	11	1.20	0.10
6	7	0.60	0.10
7	12	0.25	0.10
8	9	6.00	1.30
8	30	1.20	1.30
9	10	6.00	0.80
11	12	0.60	0.80
11	13	0.60	0.20
12	14	0.25	0.10
12	16	0.10	0.10
12	117	0.60	0.10

Tabla D.7: Fondos de escala considerados para las ramas de la red IEEE-118 en por unidad y sobre una base de 100 MVA.

Nudo inicial	Nudo final	Flujo de activa	Flujo de reactiva
13	15	0.10	0.10
14	15	0.10	0.10
15	17	4.00	0.40
15	19	0.25	0.20
15	33	0.25	0.10
16	17	0.25	0.10
17	18	1.20	0.40
30	17	4.00	0.80
17	31	0.25	0.20
17	113	0.10	0.20
18	19	0.60	0.20
19	20	0.25	0.20
19	34	0.10	0.20
20	21	0.60	0.20
21	22	0.60	0.10
22	23	1.20	0.10
23	24	0.10	0.40
23	25	4.00	0.80
23	32	1.20	0.20
24	70	0.25	0.10

Tabla D.8: Fondos de escala considerados para las ramas de la red IEEE-118 en por unidad y sobre una base de 100 MVA (continuación).

Nudo inicial	Nudo final	Flujo de activa	Flujo de reactiva
24	72	0.10	0.10
26	25	1.20	1.30
25	27	2.00	0.40
26	30	4.00	0.80
27	28	0.60	0.10
27	32	0.25	0.10
27	115	0.60	0.10
28	29	0.25	0.10
29	31	0.25	0.20
30	38	1.20	0.80
31	32	0.60	0.20
32	113	0.10	0.20
32	114	0.25	0.10
33	37	0.25	0.20
34	36	0.60	0.20
34	37	1.20	0.80
34	43	0.10	0.10
35	36	0.10	0.10
35	37	0.60	0.20
38	37	4.00	1.30

Tabla D.9: Fondos de escala considerados para las ramas de la red IEEE-118 en por unidad y sobre una base de 100 MVA (continuación).

Nudo inicial	Nudo final	Flujo de activa	Flujo de reactiva
37	39	1.20	0.10
37	40	1.20	0.20
38	65	4.00	0.80
39	40	0.60	0.40
40	41	0.60	0.10
40	42	0.10	0.20
41	42	0.10	0.20
42	49	1.20	0.40
43	44	0.25	0.10
44	45	0.60	0.10
45	46	0.60	0.10
45	49	1.20	0.10
46	47	0.60	0.10
46	48	0.25	0.10
47	49	0.10	0.20
47	69	1.20	0.20
48	49	0.60	0.10
49	50	1.20	0.20
49	51	1.20	0.40
49	54	0.60	0.20

Tabla D.10: Fondos de escala considerados para las ramas de la red IEEE-118 en por unidad y sobre una base de 100 MVA (continuación).

Nudo inicial	Nudo final	Flujo de activa	Flujo de reactiva
49	66	4.00	0.80
49	69	1.20	0.20
50	57	0.60	0.20
51	52	0.60	0.10
51	58	0.60	0.10
52	53	0.25	0.10
53	54	0.25	0.20
54	55	0.10	0.10
54	56	0.25	0.20
54	59	1.20	0.10
55	56	0.10	0.20
55	59	1.20	0.10
56	57	0.60	0.20
56	58	0.25	0.10
56	59	0.60	0.10
59	60	1.20	0.10
59	61	1.20	0.20
63	59	4.00	0.80
60	61	2.00	0.10
60	62	0.25	0.10

Tabla D.11: Fondos de escala considerados para las ramas de la red IEEE-118 en por unidad y sobre una base de 100 MVA (continuación).

Nudo inicial	Nudo final	Flujo de activa	Flujo de reactiva
61	62	0.25	0.20
64	61	0.60	0.80
62	66	0.60	0.20
62	67	0.60	0.20
63	64	4.00	0.80
64	65	4.00	0.80
65	66	0.60	1.30
65	68	0.60	0.40
66	67	1.20	0.20
68	69	2.00	1.30
68	81	1.20	0.80
68	116	2.00	0.80
69	70	2.00	0.20
69	75	2.00	0.40
69	77	1.20	0.40
70	71	0.25	0.20
70	74	0.25	0.20
70	75	0.10	0.20
71	72	0.25	0.10
71	73	0.10	0.20

Tabla D.12: Fondos de escala considerados para las ramas de la red IEEE-118 en por unidad y sobre una base de 100 MVA (continuación).

Nudo inicial	Nudo final	Flujo de activa	Flujo de reactiva
74	75	1.20	0.10
75	77	0.60	0.20
75	118	0.60	0.40
76	77	1.20	0.40
76	118	0.25	0.20
77	78	0.25	0.20
77	80	1.20	0.40
77	82	0.60	0.80
78	79	1.20	0.20
79	80	1.20	0.80
81	80	1.20	1.30
80	96	0.60	0.40
80	97	0.60	0.40
80	98	0.60	0.10
80	99	0.60	0.20
82	83	2.00	0.80
82	96	0.25	0.20
83	84	0.60	0.40
83	85	1.20	0.40
84	85	1.20	0.20

Tabla D.13: Fondos de escala considerados para las ramas de la red IEEE-118 en por unidad y sobre una base de 100 MVA (continuación).

Nudo inicial	Nudo final	Flujo de activa	Flujo de reactiva
85	86	0.25	0.10
85	88	1.20	0.40
85	89	2.00	0.20
86	87	0.10	0.20
88	89	2.00	0.20
89	90	4.00	0.80
89	92	4.00	0.80
90	91	0.60	0.10
91	92	0.60	0.20
92	93	0.60	0.20
92	94	0.60	0.20
92	100	0.25	0.40
92	102	0.60	0.20
93	94	0.60	0.40
94	95	0.60	0.20
94	96	0.10	0.10
94	100	0.25	0.80
95	96	0.25	0.40
96	97	0.25	0.40
98	100	0.25	0.10

Tabla D.14: Fondos de escala considerados para las ramas de la red IEEE-118 en por unidad y sobre una base de 100 MVA (continuación).

Nudo inicial	Nudo final	Flujo de activa	Flujo de reactiva
99	100	0.25	0.10
100	101	0.10	0.40
100	103	2.00	0.10
100	104	1.20	0.20
100	106	1.20	0.10
101	102	0.60	0.20
103	104	0.60	0.20
103	105	0.60	0.10
103	110	1.20	0.10
104	105	0.60	0.10
105	106	0.25	0.10
105	107	0.60	0.10
105	108	0.60	0.20
106	107	0.60	0.10
108	109	0.25	0.20
109	110	0.25	0.20
110	111	0.60	0.10
110	112	1.20	0.40
114	115	0.10	0.10

Tabla D.15: Fondos de escala considerados para las ramas de la red IEEE-118 en por unidad y sobre una base de 100 MVA (continuación).

Bibliografía

- [1] Aam S., Holten L., Gjerde O., "Design of the Measurement System for State Estimation in the Norwegian High Voltage Transmission Network". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-102, pp. 3769-3777, December 1983.
- [2] Abur A., "A Bad Data Identification Method for Linear Programming State Estimation". IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 5, No. 3, pp. 894-901, August 1990.
- [3] Abur A., Çelik M., "A Fast Algorithm for the Weighted Least Absolute Value State Estimation". IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 6, pp. 1-8, February 1991.
- [4] Abur A., Kim H., Çelik M., "Identifying the Unknown Circuit Breaker Statuses in Power Networks". IEEE Transactions on Power Systems, Paper 95 WM 212-1 PWRS, January 1995.
- [5] Allam M., Laughton M., "A General Algorithm for Estimating Power System Variables and Network Parameters". IEEE PES 1974 Summer Meeting, Anaheim, CA, Paper C74 331-5, 1974
- [6] Allam M., Laughton M., "Static and Dynamic Algorithms for Power System Variable and Parameter Estimation". Proceedings 5th. Power System Computation Conference, Paper 2.3/11, Cambridge, UK, September 1975.
- [7] Allam M., Rashed A., "Power System Topological Error Detection and Identification". Electrical Power & Energy Systems, Vol. 2. No. 4, pp. 201-205, October 1980.

- [8] Allemong J., Radu L., Sasson A., "A Fast and Reliable State Estimation Algorithm for AEP's New Control Center". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, pp. 933-944, April 1982.
- [9] Allen A., "Probability, Statistics, and Queuing Theory: with Computer Science Applications". Academic Press, Inc., San Diego, California, 1990.
- [10] Alvarado F., Tinney W., "State Estimation Using Augmented Blocked Matrices". IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 5, No. 3, pp. 911-921, August 1990.
- [11] Amerongen R., "On Convergence Analysis and Convergence Enhancement of Power System Least-Squares State Estimators". IEEE Transactions on Power Systems, Paper 95 WM 215-4 PWRS, January 1995.
- [12] Arafch S., Schinzinger R., "Estimation Algorithms for Large-Scale Power Systems". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-98, No. 6, pp. 1968-1977, November/December 1979.
- [13] Ariatti F., Marzio L., Ricci P., "Designing State Estimation in View of Reliability". Proceedings Power System Computation Conference, Paper 2.3/8, September 1975.
- [14] Arrillaga J., Arnold C., Harker B., "Computer Modelling of Electrical Power Systems". John Wiley & Sons Ltd., Great Britain, 1983.
- [15] Aschmoneit F., Peterson N., Adrian E., "State Estimation with Equality Constraints". Tenth PICA Conference Proceedings, Toronto, pp. 427-430, May 1977.
- [16] Barrodale I., Roberts F., "An Improved Algorithm for Discrete l_1 Linear Approximation". SIAM Journal on Numerical Analysis, Vol. 10, No. 5, pp. 839-848, October 1973.
- [17] Baldick, R., Clements K., Pinjo-Dzigan Z., Davis P., "Implementing Non-quadratic Objective Functions for State Estimation and Bad Data Rejection". IEEE Transactions on Power Systems, Paper 96 WM 301-2 PWRS, Baltimore, January 1996.
- [18] Björck Å., Duff I., "A Direct Method for the Solution of Sparse Linear Least Squares Problems". Linear Alg. and its Applic., Vol. 34, pp. 43-67, 1980.

- [19] Broussolle F., "State Estimation in Power Systems: Detecting Bad Data Through the Sparse Inverse Matrix Method". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-97, pp. 678-682, 1978.
- [20] Çelik M., Abur A., "A Robust WLAV State Estimator Using Transformations". IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 7, No. 1, pp.106-113, February 1992.
- [21] Clements K., Denison O., Ringlee R., "The Effects of Measurement Non-Simultaneity, Bias and Parameter Uncertainty on Power System State Estimation". PICA Conference Proceedings, pp. 327-331, June 1973.
- [22] Clements K., Ringlee R., "Treatment of Parameter Uncertainty in Power System State Estimation". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Anaheim, Cal., Paper C74 311-7, July 1974.
- [23] Clements K., Krumpholz G., Davis P., "Power System State Estimation with Measurement Deficiency: An Algorithm that Determines the Maximal Observable Subnetwork". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, pp. 3044-3052, September 1982.
- [24] Clements K., Davis P., "Detection and Identification of Topology Errors in Electric Power Systems". IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 3, No. 4, pp. 1748-1753, November 1988.
- [25] Clements K., Woodzell G., Burchett R., "A New Method for Solving Equality-Constrained Power System Static State Estimation". IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 5, No. 4, pp. 1260-1266, November 1990.
- [26] Clements K., "Observability Methods and Optimal Meter Placement". Electrical Power & Energy Systems, Vol. 12, No. 2, pp. 88-93, April 1990.
- [27] Clewer B., Irving M., Sterlig M., "Topologically Independent State Estimation". IFAC Symposium Power Systems. Modelling and Control Applications, Brussels, pp. 17.1.1.-17.1.13., September 1988.
- [28] Do Coutto, M., Leite A., Falcão D., "Bibliography on Power System State Estimation (1968 - 1989)". IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 5, No. 3, pp. 950-961, Agosto 1990.

- [29] Debs A., "Estimation of Steady-State Power System Model Parameters". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-93, No. 5, pp. 1260-1268, September/October 1974.
- [30] Debs A., Litzenberger W., "The BPA State Estimator Project: Tuning of Network Model". IEEE Transactions on Power Systems, Paper A 75 448-1, July 1975.
- [31] Dopazo J., Klitin O., Stagg G., Van Slyck L., "State Calculation of Power Systems from Line Flow Measurements". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-89, No. 7, pp. 1698-1709, September/October 1970.
- [32] Dopazo J., Klitin O., Van Slyck L., "State Calculation of Power Systems from Line Flow Measurements, Part II". PICA Conference Proceedings, Boston, pp. 341-347, 1971.
- [33] Dopazo J., Klitin O., Sasson A., "State Estimation for Power System Detection of Gross Measurement Errors". PICA Conference Proceedings, Minneapolis, 1973.
- [34] Dy Liacco T., "The Role and Implementation of State Estimation in an Energy Management System". Electrical Power & Energy Systems, Vol. 12, No. 2, pp. 75-79, April 1990.
- [35] Edelmann H., "A Universal Assessment for the Superior Quality of Distribution of Measuring Points for the State Estimation of High Voltage Networks". Proceedings Power System Computation Conference, Paper 2.3/7, September 1975.
- [36] Falcão D., de Assis S., "Linear Programming State Estimation: Error Analysis and Gross Error Identification". IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 3, No. 3, pp. 809-815, August 1988.
- [37] Fletcher D., Stadlin W., "Transformer Tap Position Estimation". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-102, No. 11, pp. 3680-3686, November 1983.
- [38] Gjelsvik A., Aam S., Holten L., "Hachtel's Augmented Matrix Method - A Rapid Method Improving Numerical Stability in Power System Static State Estimation". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-104, pp. 2987-2993, November 1985.

- [39] Gómez A., "Estimación de Estado en Sistemas Eléctricos de Potencia". *Automática e Instrumentación*, No. 155, pp. 185-193, Febrero 1986.
- [40] Gómez A., Martínez J., Romero E., Ruiz J., Luque A., "An Improved Topological Observability Algorithm". *Proceedings 11th. Power System Computation Conference*, pp. 627-631, Avignon, France, September 1993.
- [41] Gómez A., Martínez J., Romero E., Ruiz J., Durán J., Luque A., González F., "Development of a State Estimator Based on Line-Current Measurements". *Sociedad Española de Estadística e Investigación Operativa, Top*, Vol. 2, No. 1, pp. 85-104, 1994.
- [42] Gómez A., Abur A., Martínez J., Monroy D., Peças J., Van Cutsem T., "Power System State Estimation and Security Assessment". *EES-UEITP 1996 Course Program*, Sevilla, June 1996.
- [43] Grainger J., Stevenson W., "Análisis de Sistemas de Potencia". McGraw-Hill, Mexico D.F., 1995.
- [44] Gu J., Clements K., Krumpholz G., Davis P., "The Solution of Ill-conditioned Power System State Estimation Problems Via the Method of Peters and Wilkinson". *PICA Conference Proceedings*, Houston, pp. 239-246, May 1983.
- [45] Handschin E., Schweppe F., Kohlas J., Fiechter A., "Bad Data Analysis for Power System State Estimation". *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-94, No. 2, pp. 329-337, March/April 1975.
- [46] Handschin E., Kliokys E., "Transformer Tap Position Estimation and Bad Data Detection Using Dynamic Signal Modelling". *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 10, No. 2, pp. 810-817, May 1995.
- [47] Holten L., Gjelsvik A., Aam S., Wu F., Liu W., "Comparison of Different Methods for State Estimation". *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 3, pp. 1798-1806, November 1988.
- [48] Irving M., Owen R., Sterling M., "Power System State Estimation Using Linear Programming". *IEE Proceedings*, Vol. 125, pp. 879-885, September 1978.

- [49] Kashyap R., Rao A., "Dynamic Stochastic Models from Empirical Data". Academic Press, Inc., San Diego, California, 1976.
- [50] Koglin H., "Optimal Measuring System for State Estimation". Proceedings Power System Computation Conference, Paper 2.3/12, September 1975.
- [51] Koglin H., Oeding D., Schmitt K., "Identification of Topological Errors in State Estimation". 2nd. PSMC, IEE Durham, pp. 140-144, 1986.
- [52] Kotiuga W., Vidyasagar M., "Bad Data Rejection Properties of Weighted Least Absolute Value Techniques Applied to Static State Estimation". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, No. 4, pp. 844-853, April 1982.
- [53] Krumpholz G., Clements K., Davis P., "Power System Observability: A Practical Algorithm Using Network Topology". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-99, pp. 1534-1542, July/August 1980.
- [54] Larson R., Tinney W., Hajdu L., Piercy D., "State Estimation in Power Systems. Part II: Implementation and Applications". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-89, No. 3, pp. 353-362, March 1970.
- [55] Lebow W., Mehra R., Nadira R. Rouhani R., Usoro P., Bhavaraju M., Pal M., Sobieski D., "Optimization of Reactive Volt-Ampere (VAR) Sources in System Planning. Volume 1: Solution Techniques, Computing Methods, and Results". Electric Power Research Institute (EPRI), Cambridge, Massachusetts, November 1984.
- [56] Liu W., Wu F., Holten L., Gjelsvik A., Aam S., "Computational Issues in the Hachtel's Augmented Matrix Method for Power System State Estimation". Proceedings 9th. Power System Computation Conference, Lisbon, September 1987.
- [57] Liu W., Wu F., Lun S., "Estimation of Parameter Errors from Measurement Residuals in State Estimation". IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 7, No. 1, pp. 81-89, February 1992.

- [58] Liu W., Lim S., "Parameter Error Identification and Estimation in Power System State Estimation". IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 10, No. 1, pp. 200-209, February 1995.
- [59] Lo K., Ong P., McColl R., Moffatt A., Sulley J., "Development of a Static State Estimator, Part I: Estimation and Bad Data Suppression, Part II: Bad Data Replacement and Generation of Pseudo-Measurements". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-102, pp. 2486-2500, 1983.
- [60] Lugtu R., Hackett D., Liu K., Might D., "Power System State Estimation: Detection of Topological Errors". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-99, No. 6, pp. 2406-2412, November/December 1980.
- [61] Mayo J., Nievas J., Pastor A., "Medidas de Potencia Eléctrica: Vatímetros". Automática e Instrumentación, No. 155, pp. 135-153, Febrero 1986.
- [62] Masiello R., Schweppe F., "A Tracking Static State Estimator". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-90, pp. 1025-1033, March/April 1971.
- [63] Mili L., Van Cutsem T., Ribbens-Pavella M., "Hypothesis Testing Identification: A New Method for Bad Data Analysis in Power System State Estimation". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-103, No. 11, pp. 3239-3252, November 1984.
- [64] Mili L., Van Cutsem T., Ribbens-Pavella M., "Bad Data Identification Methods in Power System State Estimation". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-104, No. 11, pp. 3037-3049, November 1985.
- [65] Mili L., Phaniraj V., Rousseeuw P., "Least Median of Squares Estimation in Power Systems". IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 6, No. 2, pp. 511-523, May 1991.
- [66] Monticelli A., Murari C., Wu F., "A Hybrid State Estimator: Solving Normal Equations by Orthogonal Transformations". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-105, No. 2, pp. 3460-3468, December 1985.

- [67] Monticelli A., Wu F., "Network Observability: Identification of Observable Islands and Measurement Placement". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-104, pp. 1035-1041, May 1985.
- [68] Monticelli A., Wu F., "Network Observability: Theory". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-104, pp. 1042-1048, May 1985.
- [69] Monticelli A., Wu F., "Observability Analysis for Orthogonal Transformation based State Estimation". IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 1, pp. 201-208, February 1986.
- [70] Monticelli A., Wu F., Yen M., "Multiple Bad Data Identification for State Estimation by Combinatorial Optimization". IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 1, No. 3, pp. 361-369, July 1986.
- [71] Monticelli A., "Modeling Circuit Breakers in Weighted Least Squares Estimation". IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 8, No. 3, pp. 1143-1149, August 1993.
- [72] Mori H., Tsuzuki S., "A Fast Method for Topological Observability Analysis Using a Minimum Spanning Tree Technique". IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 6, No. 2, pp. 491-500, May 1991.
- [73] Mukherjee B., Fuerst G., "Transformer Tap Estimation - Field Experience". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-103, No. 6, pp. 1454-1458, June 1984.
- [74] Nucera R., Gilles M., "A Blocked Sparse Matrix Formulation for the Solution of Equality-Constrained State Estimation". IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 6, No. 1, pp. 214-224, February 1991.
- [75] Peters G., Wilkinson J., "The Least Squares Problem and Pseudo-inverse". The Computer Journal, Vol. 13, No. 4, pp. 1534-1542, 1970.
- [76] Quintana V., Van Cutsem T., "Real-Time Processing of Transformer Tap Positions". Canadian Electrical Engineering Journal, Vol. 12, No. 4, pp. 171-180, 1987.
- [77] Quintana V., Van Cutsem T., "Power System Network Parameter Estimation". Optimal Control Applications & Methods, Vol. 9, pp. 303-323, 1988.

- [78] Ruiz J., Gómez A., "Incorporación de Medidas de Intensidad en Estimación de Estado". Tesis Doctoral, Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Sevilla, Sevilla, Junio 1990.
- [79] Ruiz J., Gómez A., "A Line-Current Measurement Based State Estimator". IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 7, No. 2, pp. 513-519, May 1992.
- [80] Schweppe F., Douglas B., "Power System Static-State Estimation". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-89, pp. 120-135, 1970.
- [81] Schweppe F., Handschin E., "Static State Estimation in Electric Power Systems". Proceedings IEEE, Vol. 62, pp. 972-983, July 1974.
- [82] Simões-Costa A., Quintana V., "A Robust Numerical Technique for Power System State Estimation". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, pp. 691-698, February 1981.
- [83] Simões-Costa A., Quintana V., "An Orthogonal Row Processing Algorithm for Power System Sequential State Estimation". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, pp. 3791-3800, August 1981.
- [84] Simões-Costa A., Piazza T., "Qualitative Methods to Solve Qualitative Problems in Power System State Estimation". IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 5, No. 3, pp. 941-949, August 1990.
- [85] Simões-Costa A., Leão J., "Identification of Topology Errors in Power System State Estimation". IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 8, No. 4, pp. 1531-1538, November 1993.
- [86] Shutsker I., Clements K., "Real Time Recursive Parameter Estimation in Energy Management Systems". IEEE Transactions on Power Systems, Summer Power Meeting, Portland, Oregon, July 1995.
- [87] Shutsker I., Mokhtari S., Clements K., "On-line Parameter Estimation in Energy Management Systems". American Power Conference, Chicago, Illinois, Paper 169, April 1995.

- [88] Slutsker I., Mokhtari S., "Comprehensive Estimation in Power Systems: State, Topology and Parameter Estimation". American Power Conference, Chicago, Illinois, Paper 170, April 1995.
- [89] Smith R., "Transformer Tap Estimation at Florida Power Corporation". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-104, No. 12, pp. 3442-3445, December 1985.
- [90] Stuart T., Herget C., "A Sensitivity Analysis of Weighted Least Squares State Estimation for Power Systems". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-92, pp. 1696-1701, September/October 1973.
- [91] Sun D., Ashley B., Brewer B., Hughes A., Tinney W., "Optimal Power Flow by Newton Approach". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-103, No. 10, pp. 2864-2880, October 1984.
- [92] Takahashi, Fagan, Chen, "Formation of a Sparse Bus Impedance Matrix". 8th. PICA Conference, Minneapolis, June 1973.
- [93] Teixeira P., Brammer S., Rutz W., Merritt W., Salmonsens J., "State Estimation of Voltage and Phase-Shift Transformer Tap Settings". IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 7, No. 3, pp. 1386-1393, August 1992.
- [94] Van Cutsem T., Quintana V., "Network Parameter Estimation Using Online Data with Application to Transformer Tap Position Estimation". IEEE Proceedings, Vol. 135, Pt C, No. 1, pp. 31-40, January 1988.
- [95] Van Slyck L., Allemong J., "Operating Experience with the AEP State Estimator". IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 3, No. 2, pp. 521-528, May 1988.
- [96] Wallach Y., "Calculations and Programs for Power System Networks". Prentice Hall, 1986.
- [97] Wang J., Quintana V., "A Decoupled Orthogonal Row Processing Algorithm for Power System State Estimation". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-103, pp. 2337-2334, August 1984.
- [98] Wood A., Wollenberg B., "Power Generation, Operation & Control". John Wiley & Sons, Inc., 1984.

- [99] Wu F., Liu W., Lun S., "Observability Analysis and Bad Data Processing for State Estimation with Equality Constraints". IEEE Transactions on Power Systems, Winter Meeting, New Orleans, WM103-5, February 1987.
- [100] Wu F., Liu W., Holten L., Gjelsvik A., Aam A., "Observability Analysis and Bad Data Processing for State Estimation using Hachtel's Augmented Matrix Method". IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 3, pp. 604-611 May 1988.
- [101] Wu F., Liu W., "Detection of Topology Errors by State Estimation". IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 4, No. 1, pp. 176-183 February 1989.
- [102] Wu F., "Power System State Estimation". Electrical Power & Energy Systems, Vol. 12, No. 2, pp. 80-87, April 1990.
- [103] Zarco P., Gómez A., "Off-line Determination of Network Parameters in State Estimation". Proceedings 12th. Power System Computation Conference, pp. 1207-1213, Dresden, Germany, August 1996.
- [104] Zarco P., Gómez A., "Estimación de Parámetros en Redes Eléctricas: Problemática y Soluciones Adoptadas". Aceptado 5^{as} Jornadas Hispano-Lusas de Ingeniería Eléctrica, Salamanca, Julio 1997.
- [105] Zollenkopf K., "Sparse Nodal Impedance Matrix Generated by the Bifactorization Method and Applied to Short Circuits Studies". Proceedings Power System Computation Conference, Cambridge, Paper 3.1/3, 1975.