

UNIVERSIDAD DE SEVILLA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

**TÉCNICA MEJORADA DE CONTROL
REACTIVO APLICADA
A CENTRALES UNDIMOTRICES
CON ACCIONAMIENTO DIRECTO
MEDIANTE GENERADORES LINEALES**

TESIS DOCTORAL

por

D. Agustín García Santana

Ingeniero Industrial por la E.T.S. de Ingenieros Industriales
de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria

Sevilla, Noviembre de 2013

UNIVERSIDAD DE SEVILLA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

**TÉCNICA MEJORADA DE CONTROL
REACTIVO APLICADA
A CENTRALES UNDIMOTRICES
CON ACCIONAMIENTO DIRECTO
MEDIANTE GENERADORES LINEALES**

TESIS DOCTORAL

Autor:

D. Agustín García Santana

Director de Tesis:

Dr. D. Antonio de la Villa Jaén

Sevilla, Noviembre de 2013

A mis hijos, Inés y Héctor, y a mi mujer, Alejandra.

“Hay una fuerza motriz más poderosa que el vapor, la electricidad y la energía atómica: la voluntad”

Albert Einstein

“El hombre que se levanta es aún más grande que el que no ha caído”

Concepción Arenal

(observando el horizonte) “Mira, Agustín, el enorme potencial energético que encierran mares y océanos”

Mi padre, 1981

Agradecimientos

Quiero en estas líneas expresar mi agradecimiento a todas las personas que han colaborado de alguna manera en la realización de esta tesis.

En primer lugar mostrar mi gratitud a Antonio de la Villa Jaén por su confianza, dedicación y buen hacer en la dirección de esta tesis.

A mis padres José Manuel y Rita Dolores, mis tías María del Carmen e Inmaculada y mis hermanos Manolo y Gemma por su apoyo. A mi compañero Dan El Montoya Andrade por haber querido formar parte del equipo que ha hecho posible la buena consecución de las investigaciones.

Gracias a todos los miembros del Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Sevilla por el apoyo recibido. Agradecer también a la Universidad de Sevilla los medios ofrecidos durante mi estancia como Doctorando en dicha universidad.

Gracias a la Fundación Focus-Abengoa y a AG Ingeniería, por haber respaldado anímicamente y financieramente la idea inicial que se fragua en el presente documento.

Finalmente, agradecer a mi mujer, Alejandra, y a mis hijos, Inés y Héctor, la comprensión mostrada por el tiempo que no he podido compartir con ellos durante estos años.

Sevilla, Noviembre de 2013.

El autor.

Índice general

1. Planteamiento y Objetivo de la Tesis	1
2. Introducción a la energía undimotriz	9
2.1. La Energía Oceánica: tipos y descripción	9
2.2. Potencial y expectativas de la energía undimotriz	10
2.3. Análisis de la energía primaria	11
2.3.1. Parámetros característicos del oleaje regular	12
2.3.2. Energía contenida en las olas armónicas	13
2.3.3. Flujo energético	13
2.3.4. Oleaje Real	13
2.4. Descripción general de los tipos de WECs	15
2.4.1. Técnicas para aprovechar la energía de las olas	15
2.4.2. Clasificación de los convertidores de las olas	16
2.4.3. Tipos de convertidores	18
2.5. Técnicas de control aplicadas a los WECs	35
3. El absorbedor puntual	41
3.1. Análisis de los flujos de potencia en los WECs	41
3.1.1. Etapas	42
3.1.2. Flujos de potencia	42
3.1.3. Tipos de potencia	43
3.2. Definición de absorbedor puntual	44
3.2.1. Absorbedor puntual de accionamiento directo mediante generador lineal	45
3.3. Modelo dinámico del absorbedor puntual	46
3.3.1. Modelo dinámico en el dominio de la frecuencia	49
3.3.2. Modelo dinámico en el dominio del tiempo	50
3.4. Absorber olas significa generar olas	52

4. El Generador Lineal	55
4.1. Introducción	55
4.2. Concepto de generador lineal	55
4.2.1. Generador eléctrico	55
4.2.2. Generador síncrono	56
4.2.3. Implantación del generador lineal en WECs	56
4.3. Generadores lineales. Tipos y descripción constructiva	57
4.3.1. Tipos de generadores lineales	57
4.3.2. Topología del generador lineal de imanes permanentes	58
4.3.3. Generador lineal del proyecto de Lysekil	58
4.4. Modelo del generador síncrono lineal de imanes permanentes	59
4.5. Convertidores de potencia	62
4.5.1. Topologías de interfase con la red eléctrica en centrales undimotrices	64
4.5.2. Descripción del convertidor back-to-back	67
5. Control reactivo convencional	71
5.1. Introducción	71
5.2. Frecuencia natural y de resonancia	71
5.2.1. Definición de frecuencia natural	71
5.2.2. Definición de frecuencia de resonancia	72
5.3. Control reactivo convencional	73
5.4. Control reactivo óptimo. Denominaciones	75
5.5. Causalidad	77
5.5.1. Control pasivo (RLC)	79
5.5.2. Control complejo-conjugado aproximado (ACC)	80
5.6. Resultados	82
5.6.1. Potencia absorbida por el sistema de extracción de potencia	83
6. Consideración de las pérdidas en el generador lineal	85
6.1. Introducción	85
6.2. Procedimiento	85
6.3. Energía transferida al convertidor primario	86
6.4. Resultados	89
6.4.1. La potencia transferida al sistema de extracción de potencia y al convertidor electrónico	89
6.4.2. Potencia transferida al convertidor primario en función de los parámetros de control	90

6.4.3.	Potencia transferida al convertidor de potencia	92
6.4.4.	Ratio entre la potencia pico y la potencia media	93
6.4.5.	Amplitud y velocidad máxima del sistema oscilante	94
6.5.	Conclusiones	96
7.	Control Reactivo Mejorado	97
7.1.	Introducción	97
7.2.	Procedimiento	98
7.3.	Potencia máxima transferida al convertidor primario	99
7.4.	Resultados	103
7.4.1.	Oleaje regular	103
7.4.2.	Oleaje irregular	107
7.5.	Análisis de la sensibilidad	111
7.5.1.	Respuesta del sistema en función del radio de la esfera	112
7.5.2.	Sensibilidad a la resistencia del generador	113
7.5.3.	Sensibilidad al flujo de los imanes permanentes	114
7.6.	Conclusiones	115
8.	Conclusiones y Futuras Líneas de Investigación	117
8.1.	Resumen y conclusiones	117
8.2.	Aportaciones originales	119
8.3.	Listado de publicaciones	120
8.3.1.	Otras colaboraciones del autor	120
8.4.	Futuras líneas de investigación	121
A.	Desarrollos matemáticos realizados durante la maximización de la potencia transferida al convertidor primario	133
A.1.	Derivada de la expresión respecto al parámetro de control r_{pto}	133
A.2.	Derivada de la expresión respecto al parámetro de control x_{pto}	135
A.3.	Relación lineal entre los parámetros de control r_{pto} y x_{pto}	137

Índice de figuras

2.1. Parámetros del oleaje	12
2.2. Distribución global aproximada de los niveles de potencia del oleaje	14
2.3. Clasificación de WECs según su principio de funcionamiento	18
2.4. Ilustración del OWC	19
2.5. La Ballena Poderosa	23
2.6. <i>SperboyTM</i>	24
2.7. Dispositivo Bluewave	25
2.8. Convertidor Waveroller	26
2.9. Montaje del Oyster	27
2.10. Oyster en funcionamiento	27
2.11. Convertidor de energía de las olas Langlee	28
2.12. Descripción del WEC Langlee	28
2.13. Funcionamiento normal del Wavestar	29
2.14. Posición de supervivencia del Wavestar	30
2.15. Convertidor WEPTOS	30
2.16. Convertidor Pelamis	31
2.17. Convertidor SSG en rompeolas	33
2.18. Sección transversal del SSG	34
2.19. Convertidor Wave Dragon	34
2.20. Control Latching. Desplazamiento vertical del sistema oscilante y elevación de la ola en función del tiempo	38
3.1. Etapas de conversión energética en un WEC	42
3.2. Esquema general de un absorbedor puntual de accionamiento directo para la conversión de energía de las olas	46
3.3. Absorción de oleaje mediante un WEC	53
4.1. Tensión de salida monofásica de un generador lineal	63

Índice de figuras

4.2.	Representación esquemática del sistema de interconexión de un WEC	64
4.3.	Generador de inducción con un STATCOM conectado en paralelo como tecnología de interfase	65
4.4.	Generador de inducción con un convertidor back-to-back en serie como tecnología de interfase	66
4.5.	Generador de inducción doblemente alimentado con convertidor de rotor como tecnología de interfase	67
4.6.	Generador síncrono con un convertidor back-to-back en serie como tecnología de interfase	67
4.7.	Configuración de un convertidor back-to-back	68
5.1.	Ejemplo de serie temporal cuando se aplica una estrategia de control RLC	79
5.2.	Ejemplo de serie temporal cuando se aplica una estrategia de control ACC	82
5.3.	Potencia absorbida por el sistema de extracción de potencia para cada estrategia, con alturas significantes (a) $H=1.4$ m (b) $H=2.2$ m (c) $H=3$ m	83
6.1.	Potencia absorbida por el sistema de extracción de potencia y potencia transferida al convertidor primario	90
6.2.	Pérdidas en el generador lineal	91
6.3.	Potencia transferida al convertidor primario	92
6.4.	Potencia transferida al convertidor de potencia para cada estrategia, con alturas significantes (a) $H=1.4$ m (b) $H=2.2$ m (c) $H=3$ m	93
6.5.	Ratio entre la potencia pico y la potencia media, con alturas significantes (a) $H=1.4$ m (b) $H=2.2$ m (c) $H=3$ m	94
6.6.	Velocidad máxima alcanzada por el sistema oscilante para cada estrategia, con alturas significantes (a) $H=1.4$ m (b) $H=2.2$ m (c) $H=3$ m	95
6.7.	Amplitud máxima alcanzada por el sistema oscilante para cada estrategia, con alturas significantes (a) $H=1.4$ m (b) $H=2.2$ m (c) $H=3$ m	95
7.1.	Potencia transferida desde el generador lineal al convertidor de potencia en oleaje regular, con alturas de ola (a) $H=1.4$ m (b) $H=2.2$ m (c) $H=3$ m	104

7.2. Potencia capturada por el sistema de extracción de potencia, con alturas de ola (a) $H=1.4$ m (b) $H=2.2$ m (c) $H=3$ m	105
7.3. Ratio entre la potencia pico y la potencia media, con alturas de ola (a) $H=1.4$ m (b) $H=2.2$ m (c) $H=3$ m	106
7.4. Máxima velocidad del sistema oscilante, con alturas de ola (a) $H=1.4$ m (b) $H=2.2$ m (c) $H=3$ m	106
7.5. Máxima amplitud del sistema oscilante, con alturas de ola (a) $H=1.4$ m (b) $H=2.2$ m (c) $H=3$ m	107
7.6. Potencia transferida al convertidor de potencia para cada estrategia, con alturas significantes (a) $H=1.4$ m (b) $H=2.2$ m (c) $H=3$ m	108
7.7. Potencia absorbida por el sistema de extracción de potencia para cada estrategia, con alturas significantes (a) $H=1.4$ m (b) $H=2.2$ m (c) $H=3$ m	109
7.8. Ratio entre la potencia pico y la potencia media, con alturas significantes (a) $H=1.4$ m (b) $H=2.2$ m (c) $H=3$ m	110
7.9. Velocidad máxima alcanzada por el sistema oscilante para cada estrategia, con alturas significantes (a) $H=1.4$ m (b) $H=2.2$ m (c) $H=3$ m	111
7.10. Amplitud máxima alcanzada por el sistema oscilante para cada estrategia, con alturas significantes (a) $H=1.4$ m (b) $H=2.2$ m (c) $H=3$ m	111

Índice de cuadros

2.1. Fuentes de energía renovable en $[10^{18}J]$	11
4.1. Características del generador lineal	58
7.1. Potencia transferida al convertidor y periodos en función del radio de la esfera	112
7.2. Potencia transferida al convertidor y periodos en función de la resistencia del generador	113
7.3. Potencia transferida al convertidor y periodos en función del flujo de los imanes permanentes	114

Capítulo 1

Planteamiento y Objetivo de la Tesis

Los océanos cubren más del 70% de la tierra y desde hace mucho tiempo han sido considerados como una fuente inmensa de energía renovable. Los mares y océanos, además de contener productos químicos y biológicos, almacenan energía en distintas formas, como por ejemplo, la energía cinética, la térmica, la potencial, etc.

La parte de la energía oceánica global que puede ser aprovechada, es aquella que se ubica en lugares económicamente factibles para ser explotados con la tecnología disponible. Esta fracción podría contribuir considerablemente al suministro eléctrico. La generación de energía eléctrica a partir de la energía de las olas puede ser económicamente factible en un futuro cercano [1]. Por este motivo, el sector de la energía marina se está investigando a nivel mundial [2], [3].

Se han sugerido numerosas técnicas para extraer energía del mar, muchas de las cuales pueden incluirse en alguna de las siguientes fuentes energéticas: olas, mareas, corrientes marinas, gradientes térmicos oceánicos, gradientes de salinidad (osmosis) y cultivos de biomasa marina.

La energía cinética presente en las corrientes marinas y la potencial, obtenida por las diferencias de altura en las mareas, pueden convertirse en energía eléctrica utilizando tecnología basada en turbinas convencionales. La conversión de la energía térmica de los océanos es posible en ubicaciones con grandes diferencias de temperatura entre la superficie y los fondos marinos. Los gradientes de salinidad pueden ser aprovechados para extraer energía mediante procesos osmóticos. El cultivo de biomasa marina puede dar lugar a productos, como los combustibles fósiles, que permiten generar electricidad. Debido a las

limitaciones tecnológicas y a las consideraciones económicas, los desarrollos de las energías térmica y osmótica se han visto frenados [4], [5], [6].

La energía undimotriz es aquella contenida en las olas que se forman en la superficie de mares y océanos. Se pretende capturar dicha energía para transformarla en otro tipo de energía con objeto de que pueda realizar trabajo útil.

Según el Consejo de Energía Mundial, entre 140 y 700 TWh/año de energía de las olas están disponibles y económicamente accesibles, lo que supondría aproximadamente entre un 1-5 % de la demanda eléctrica anual en el mundo [7].

Se estima que la contribución energética de los WECs (Wave Energy Converters) podría llegar a ser superior a 2000 TWh/año con sistemas de conversión más eficientes, lo que significa que potencialmente se podría abastecer gran parte de la demanda energética mundial [8].

Aprovechar la energía contenida en las olas, supone una serie de desafíos tecnológicos que han dado lugar a una gran variedad de diseños. El desarrollo de la energía de las olas se ha centrado más en el método de extracción que en la conversión a potencia eléctrica. En consecuencia, se han implementado en los convertidores de energía de las olas (WECs) sistemas de extracción de potencia, habitualmente denominados sistemas PTO (Power Take-Off), que utilizan generadores eléctricos rotativos convencionales de alta velocidad, como máquinas de inducción y síncronas. De entre todas las tecnologías propuestas hasta este momento, esta tesis se centra en las técnicas de control reactivo de los absorbedores puntuales que accionan directamente a generadores lineales, los cuales se han propuesto como una alternativa viable al uso de máquinas rotativas convencionales [9], [10]. Actualmente, la electrónica de potencia hace posible implementar estrategias de control utilizando conjuntamente generadores eléctricos y convertidores de potencia en configuración "back to back".

Mediante el uso de generadores lineales que trabajan a baja velocidad, se elimina la necesidad de implementar interfases mecánicas, que conllevan sistemas neumáticos e hidráulicos complejos. Es decir, se obtiene un sistema de extracción de potencia más simple con menos pérdidas por conversión. El movimiento recíproco del generador lineal implica que los sistemas de extracción de potencia de accionamiento directo pueden ser implementados en absorbedores puntuales mediante acoplamiento directo, entendiéndose por absorbedor puntual el WEC cuyas dimensiones físicas son pequeñas en comparación con la longitud de ola incidente.

La frecuencia a la cual las olas del mar excitan a los WECs puede

variar enormemente, pero el ancho de captura del dispositivo es limitado. Los absorbedores puntuales tienen un ancho de captura estrecho, por lo que las características del dispositivo deben ajustarse a las condiciones del oleaje, de manera que se pueda inyectar a red la máxima cantidad de energía procedente de las olas. Esto implica controlar el movimiento recíproco del WEC, al objeto de que trabaje adecuadamente en un amplio rango de frecuencias del oleaje.

Tradicionalmente se ha considerado que las condiciones de control óptimo de los dispositivos WEC son aquellas que maximizan la potencia absorbida en el sistema oscilante. Estas condiciones implican intercambios bidireccionales de energía entre el sistema oscilante y el sistema extractor de potencia (máquina eléctrica), por lo que a este tipo de estrategias de control se les conoce como estrategias de control reactivo.

Los investigadores han propuesto varios métodos mecánicos o electromecánicos para alcanzar el control, muchos de los cuales tienen como objetivo obtener una amplitud y una fase de oscilación óptimas, para maximizar la energía extraída [11], [12], [13]. También se han propuesto métodos para controlar un absorbedor puntual, utilizando un generador eléctrico lineal directamente acoplado al sistema oscilante [14].

Sin embargo, la implementación práctica de estas estrategias de control reactivo conlleva problemas derivados de la gran cantidad de energía intercambiada entre las distintas partes del convertidor y también debidos a las elevadas excursiones y velocidades que alcanza el sistema oscilante.

El objetivo de esta tesis radica en integrar las pérdidas en el cobre del generador en el proceso de optimización. De esta forma se busca maximizar, no la energía entregada al sistema de extracción de potencia, sino al convertidor primario, y por ende, a incrementar la potencia inyectada en la red eléctrica. Entre las diferentes pérdidas que se producen en un generador lineal, son las pérdidas en el cobre las que suponen el volumen de pérdidas más significativo. Por consiguiente, tanto el modelo como la estrategia de control propuesta deben:

- Incorporar las pérdidas en el cobre del generador lineal en el modelo hidrodinámico de un absorbedor puntual, de manera que se pueda cuantificar la energía eléctrica entregada a los convertidores de potencia.
- Desarrollar una estrategia de control que permita maximizar la energía eléctrica entregada por el generador lineal a los convertidores electrónicos de potencia.

La metodología utilizada para alcanzar los objetivos propuestos ha sido:

- Establecer un modelo de la instalación, en donde se refleje el oleaje, el sistema oscilante, el generador lineal y la electrónica de potencia utilizada.
- Implementar la estrategia de control reactivo convencional para la instalación modelada, que permita maximizar la energía transferida al sistema de extracción de potencia.
- Desarrollar una estrategia de control mejorada que permita maximizar la energía transferida al convertidor primario.
- A partir de las condiciones óptimas anteriores, obtener una estrategia de control causal sub-óptima.

La exposición del contenido de la tesis se ha estructurado en ocho capítulos:

- En el primer capítulo se presenta el planteamiento y los objetivos de la tesis.
- En el segundo capítulo se realiza una descripción de la energía primaria que se pretende aprovechar, y seguidamente, se muestran los principios de funcionamiento de las tecnologías más relevantes para aprovechar la energía undimotriz y algunos dispositivos basados en ellas.
- En el tercer capítulo se realiza un análisis de los flujos de potencia que se transfieren en cada etapa de la instalación de un WEC, definiéndose los tipos de potencia involucrados en el proceso. A continuación, se define y describe el absorbedor puntual y su modelo matemático, tanto en el dominio del tiempo como de la frecuencia. También se analizan los parámetros hidrodinámicos relacionados con el absorbedor puntual.
- En el cuarto capítulo se presenta el modelo de un generador eléctrico lineal, caracterizado por utilizar, en vez de rotor (movimiento de rotación), un traslator (movimiento de traslación). Dicho modelo se ceñirá al caso del generador síncrono de imanes permanentes.

También se realiza una clasificación de los diferentes tipos de generadores lineales y se describe con detalle el generador lineal utilizado en las simulaciones.

Por otro lado, se analiza la relación existente entre la fuerza ejercida por el sistema de extracción de potencia y la corriente estatórica en cuadratura de los devanados.

Asimismo, se muestran las configuraciones más habituales para conectar el sistema de extracción de potencia de una central undimotriz, con la red eléctrica, y se describe la electrónica de potencia utilizada para conectar el generador a la red eléctrica, que consta fundamentalmente de un convertidor de potencia en configuración “back to back”.

- En el quinto capítulo se analiza la estrategia de control objeto de esta tesis, aplicada a los absorbedores puntuales: el control reactivo hidrodinámico. Por tanto, se expondrán las condiciones de optimalidad que maximizan la extracción de energía, las cuales se conocen como control de fase y control de amplitud.

El control de fase establece que la velocidad del sistema oscilante debe estar en fase con la fuerza de excitación ejercida sobre él en oleaje regular. Esto sucede cuando la frecuencia del oleaje coincide con la frecuencia natural del dispositivo. Cuando esto no suceda, el sistema de control debe actuar sobre el sistema oscilante para que la condición se cumpla.

La condición de amplitud óptima establece que, si la amplitud no está restringida, la resistencia del sistema de extracción de potencia debe ser igual a la resistencia de radiación, a la frecuencia del oleaje incidente.

Para que se pudiese implementar el control reactivo sería necesario realizar una retroalimentación directa de la velocidad del cuerpo oscilante. Desafortunadamente, la fuerza óptima aplicada por el sistema de extracción de potencia al cuerpo oscilante, depende de valores futuros de la velocidad del cuerpo oscilante, lo cual obviamente es imposible de implementar en la práctica, ya que la velocidad depende a su vez de la fuerza ejercida por el sistema de extracción de potencia.

Por tanto, estamos obligados a buscar aproximaciones que permitan la implementación práctica del control reactivo. Son las denominadas estrategias subóptimas. Una de ellas, es el control complejo-conjugado aproximado, en el que el ajuste de los parámetros de control se particulariza para una frecuencia adecuadamente elegida, que suele ser la frecuencia pico del espectro del oleaje. Otra estrategia subóptima es el control pasivo, donde la fuerza ejercida por el sistema de extracción de potencia sólo depende de la velocidad del cuerpo oscilante.

- En el sexto capítulo, se presenta el procedimiento que permite cuantificar la energía transferida al convertidor “back to back” considerando las pérdidas en el cobre del generador. Para ello, se parte del análisis desarrollado en los capítulos anteriores, que permitió definir un modelo hidrodinámico para los sistemas oscilantes y establecer las bases del control del movimiento de dicho sistema (*control reactivo convencional*).

La formulación desarrollada permite evaluar la potencia entregada al convertidor de potencia cuando se consideran las pérdidas en el cobre del generador. De esta forma, se ha podido evaluar, para oleaje regular, cómo varía esta potencia en el convertidor frente a diferentes valores de los parámetros de control. El análisis de los resultados claramente pone de manifiesto que existen unos valores de los parámetros de control que maximizan la potencia entregada en el convertidor.

Además, se analiza el comportamiento de un WEC sometido a control complejo-conjugado aproximado, y se llega a la conclusión de que existen deficiencias en dicho control e importantes dificultades para su implementación.

- En el séptimo capítulo se presenta el procedimiento que permite mejorar el control descrito en los capítulos anteriores, *el control reactivo mejorado*.

Para desarrollar el *control reactivo mejorado*, se maximiza la expresión de la potencia transferida al convertidor de potencia considerando las pérdidas en el cobre del generador, que fue hallada en el capítulo anterior. De esta forma, se obtienen las condiciones de los parámetros de control que maximizan la potencia en el convertidor.

Como se mencionó anteriormente, el control reactivo no puede ser implementado prácticamente en oleaje real, ya que la fuerza óptima que debe ejercer la máquina eléctrica depende de los valores que tendrá la velocidad del cuerpo oscilante en el futuro. Se dice entonces que el control es no causal. Por tanto, hay que recurrir a estrategias sub-óptimas, que permitan realizar un control causal, y por tanto, implementable. En esta tesis se propone sintonizar el WEC a una determinada frecuencia adecuadamente elegida, en función del estado del oleaje. En las simulaciones desarrolladas en esta tesis se utiliza la frecuencia pico del espectro del oleaje.

En los resultados, se compara el control propuesto con otros dos controles habituales en este tipo de instalaciones: el control pasivo y el control complejo-conjugado aproximado.

Dicha comparación se realiza considerando la potencia transferida al convertidor de potencia, la potencia absorbida por el sistema de extracción de potencia, el ratio entre potencia pico y potencia media, y las amplitudes y velocidades de oscilación del sistema oscilante, para cada tipo de control aplicado.

Además, se realizaron simulaciones para evaluar cómo varía la potencia entregada al convertidor en función del tamaño del dispositivo oscilante, la resistencia del generador y del flujo de los imanes permanentes, para un WEC determinado.

Para las simulaciones, se han utilizado las características de una instalación real. El modelo de generador lineal implementado corresponde al proyecto de Lysekil, que se ha desarrollado en el centro sueco para la conversión de energía eléctrica renovable de la Universidad de Uppsala.

- Por último, el octavo capítulo recoge las conclusiones del trabajo desarrollado en el ámbito de la presente tesis, proponiendo asimismo futuras líneas de investigación.

Capítulo 2

Introducción a la energía undimotriz

En este capítulo, se presentan las principales formas de energía que contienen los mares y océanos, y se describe de forma genérica su energía primaria, los tipos de tecnologías relacionadas con el aprovechamiento de la energía undimotriz y algunas de sus estrategias de control.

Inicialmente se enumeran las energías oceánicas aprovechables. A continuación, se realiza una descripción de la energía primaria que se pretende aprovechar. Seguidamente, se muestran los principios de funcionamiento de las tecnologías más relevantes para aprovechar la energía undimotriz y algunos dispositivos basados en ellas.

Por último, se define a grandes rasgos las principales estrategias de control aplicadas a los WECs.

2.1. La Energía Oceánica: tipos y descripción

Las principales formas de energía aprovechable que contienen los mares y océanos son:

1. La energía de las mareas: la diferencia de cotas de nivel de agua entre la pleamar y la bajamar puede ser aprovechada. Se almacena agua para posteriormente turbinarla, de forma similar a lo realizado en una central hidroeléctrica.
2. La energía de las corrientes marinas: la energía cinética de las corrientes marinas puede ser aprovechada usando técnicas similares a las utilizadas

para extraer la energía del viento.

3. El gradiente de energía térmica oceánica: esta tecnología aprovecha el gradiente térmico existente entre la superficie y las profundidades de los océanos. Se genera electricidad mediante ciclos termodinámicos.
4. La energía de las olas: Se utilizan convertidores para aprovechar la energía cinética, potencial y de presión que contiene el oleaje. Las olas del mar son un derivado terciario de la energía solar. El calentamiento de la superficie terrestre genera viento, y el viento a su vez genera el oleaje. A la energía contenida en las olas se le denomina energía undimotriz.
5. El gradiente de salinidad entre el agua del mar y de los ríos es también una fuente de energía. Se está trabajando en dos tecnologías diferentes para el aprovechamiento del gradiente salino:
 - Retardo de la presión Osmótica (PRO - Pressure-Retarded Osmosis). Consiste en bombear agua marina a un depósito ubicado en la desembocadura de un río. Existe una diferencia de presión osmótica entre el agua contenida en dicho depósito, y la del río. El agua dulce fluye a través de una membrana semipermeable incrementando el volumen de agua en el depósito que puede generar electricidad mediante una turbina hidráulica.
 - Electrodiálisis inversa (RED - Reverse electro dialysis). Consiste en el fenómeno inverso a la desalación de agua: mediante membranas selectivas a los iones se crea electricidad en forma de corriente continua.

La presente tesis se centra en la energía de las olas.

2.2. Potencial y expectativas de la energía undimotriz

El incremento constante de la necesidad de energía en el mundo, junto a los peligros que supone el seguir utilizando recursos fósiles, ha hecho que durante los últimos años hayan proliferado las tecnologías energéticas renovables. La gran cantidad de energía que encierran los océanos viene analizándose desde hace décadas [15], [16].

La tabla 2.1, muestra la cantidad de energía que se aprovecha de alguna de las fuentes renovables [17]:

Fuente	Disponible	Actualmente utilizada
Biomasa	283	50
Hidroeléctrica	50	10
Solar	1570	0.2
Eólica	580	0.2
Geotérmica	1401	2
Oceánica	730	0
Total	4614	62.4

Cuadro 2.1: Fuentes de energía renovable en [$10^{18} J$]

La cantidad de energía que se puede extraer depende del rendimiento de la tecnología que se utilice. En cualquier caso, el potencial es suficientemente atractivo como para proceder a su estudio. Numerosos proyectos han intentado aprovechar la energía de las olas, de los cuales varios se encuentran activos en el mundo, por ejemplo, el proyecto Pelamis y el Wave Dragon. Históricamente, la mayoría de los intentos consistentes en crear una tecnología que sobreviva a los duros climas oceánicos, o que sea viable económicamente, han fallado. La utilización de la energía de las olas presenta ventajas en comparación con otras fuentes de energía intermitentes, como la solar o eólica: se trata de una forma de energía predecible y estable, ya que las olas absorben la energía de los vientos que soplan en grandes áreas, y facilitan su predicción. Incluso si el viento cesa, las olas seguirán su curso durante algún tiempo. Una de las mayores dificultades que presenta el aprovechamiento de las olas, estriba en las inmensas potencias implicadas, que complican la capacidad de supervivencia de los WECs.

2.3. Análisis de la energía primaria

El oleaje puede ser considerado regular o irregular. Las olas regulares son aquellas que mantienen su altura y su longitud de onda en el tiempo, sin variaciones en el tamaño o en la forma. Sin embargo, en la realidad sucede justamente lo contrario, es decir, que las olas de la mar son irregulares en el tiempo y en el espacio. Por lo tanto, deben ser consideradas desde el punto de vista estadístico. El origen de la irregularidad es diverso: variaciones de profundidad a lo largo del espacio, variación de la fuerza del viento, etc.

El oleaje irregular puede ser explicado por el teorema de superposición, ya que la ola irregular, realmente puede ser descrita por la superposición de olas sinusoidales de diversa amplitud y frecuencia.

2.3.1. Parámetros característicos del oleaje regular

Para estudiar las olas regulares y sus efectos, es imprescindible definir los siguientes parámetros característicos, que posteriormente se muestran en la figura 2.1:

Valle: cota más baja de la ola.

Cresta: cota más alta de la ola.

Longitud de onda o de la ola (λ): distancia que separa dos crestas consecutivas.

Altura de la ola (H): distancia vertical que separa la cresta del valle.

Periodo del oleaje (T): tiempo que transcurre entre el paso de dos crestas consecutivas.

Velocidad de la ola (v): resultado de dividir la longitud de la ola entre el periodo.

Profundidad del mar u océano (h).

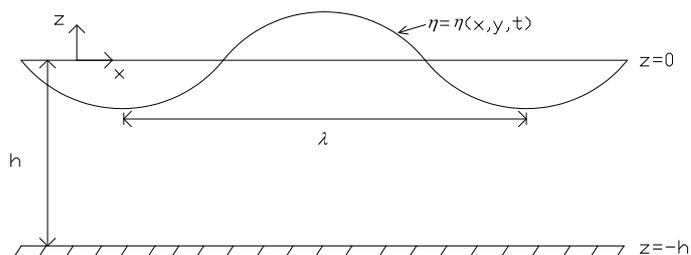


Figura 2.1: Parámetros del oleaje

Donde y representa el ancho de ola y η la elevación de la ola en un instante determinado. Tres de estos parámetros representan los valores característicos de una ola: la altura de la ola, la longitud de la ola y su periodo.

2.3.2. Energía contenida en las olas armónicas

Si se considera la teoría lineal de las olas, la energía por metro cuadrado de superficie oceánica puede calcularse como la suma de la energía potencial y cinética de las partículas de agua. La energía potencial media por unidad de área resulta ser [18]:

$$\bar{E}_p = \frac{H^2}{16}g\rho \quad (2.1)$$

donde g y ρ representan respectivamente la aceleración gravitatoria y la densidad del agua. La energía cinética media por unidad de área es:

$$\bar{E}_k = \frac{H^2}{16}g\rho \quad (2.2)$$

Esta expresión coincide con la energía potencial. Por lo tanto, la energía total por unidad de área en el océano, es:

$$\bar{E}_{total} = \bar{E}_p + \bar{E}_k = \frac{H^2}{8}g\rho \quad (2.3)$$

2.3.3. Flujo energético

Habitualmente las olas se describen en función de su potencia y no en términos energéticos. Para ello, una unidad ampliamente empleada para expresar la potencia es kW/m, donde se indica la potencia que posee la ola, por metro de frente de ola (distancia paralela a la costa). La figura 2.2 muestra los niveles de potencia undimotriz en el mundo.

El flujo energético medio \bar{J} se puede calcular del siguiente modo [18],

$$\bar{J} = \frac{\rho g^2}{32\pi}TH^2 \quad (2.4)$$

La expresión (2.4) indica que, en un oleaje regular, la potencia por metro de frente ola es directamente proporcional al periodo de la ola y aumenta cuadráticamente con la altura de ola.

2.3.4. Oleaje Real

A medida que aumenta la aproximación al oleaje real, el modelo matemático se complica. El oleaje real es una superposición compleja de numerosos grupos de olas no regulares, con distintos valores de periodo, altura,

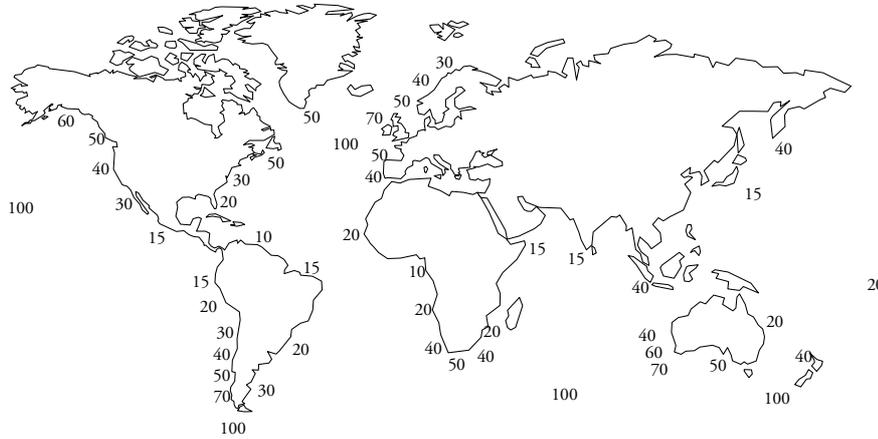


Figura 2.2: Distribución global aproximada de los niveles de potencia del oleaje

dirección, etc. La potencia de las olas se define mediante el espectro direccional completo del estado del mar.

Se indican a continuación las principales fórmulas propuestas por los investigadores, para determinar la potencia real del oleaje, en vatios por metro de frente de ola:

$$P_T = 423T_P H_S^2 \quad (2.5)$$

Espectro ISSC:

$$P_T = 594,9T_Z H_S^2 \quad (2.6)$$

Pierson-Moskowitz:

$$P_T = 549T_Z H_S^2 \quad (2.7)$$

Jonswap:

$$P_T = 458T_Z H_S^2 \quad (2.8)$$

en donde,

- H_S es la altura significativa, que se define como la altura representativa de la banda de máxima energía que existe en un determinado oleaje. A efectos prácticos, se asemeja a la altura media del tercio de las olas más altas.
- T_P es el periodo pico, que se define como el periodo representativo de la banda de máxima energía (asociado a H_S).

- T_Z es el periodo o tiempo de paso de dos olas consecutivas por una línea imaginaria situada a la mitad de la distancia entre la cresta y el valle; este parámetro indica lo ordenado que está el oleaje.

2.4. Descripción general de los tipos de WECs

En esta sección se presenta el estado del arte de la tecnología undimotriz. En primer lugar, se exponen algunas de las clasificaciones que habitualmente se utilizan para clasificar a los WECs. Posteriormente, se analizan los diferentes tipos de convertidores basados en sus principios de funcionamiento, mostrando algún ejemplo de cada uno de ellos.

2.4.1. Técnicas para aprovechar la energía de las olas

Las grandes variaciones que se producen continuamente en las características del oleaje, complican el diseño de máquinas y dispositivos que puedan convertir la energía contenida en las olas, en otro tipo de energía. Estos sistemas deben captar la energía mecánica, de forma completamente aleatoria, y convertirla eficientemente en otra forma de energía útil, generalmente energía eléctrica.

Se pueden aprovechar tres fenómenos básicos que se producen en las olas:

- Empuje de la ola.- La energía de las olas se puede absorber mediante un obstáculo que transmite la energía a un pistón. Se trata de un sistema poco usado.
- Variación de la altura de la ola.- Se aprovecha la altura (energía potencial) que adquiere la masa de agua, debido a la formación de la ola. Los WECs basados en este principio pueden situarse en la costa, en aguas someras o en las profundidades.
- Variación de la presión bajo la superficie libre de la ola.- Se aprovecha la presión que se produce al variar la masa de agua debido a la formación de la ola. Los WECs basados en este principio pueden ser de dos tipos: los sistemas de columna oscilante de agua (Oscillating Water Column: OWC) y los absorbedores puntuales.

2.4.2. Clasificación de los convertidores de las olas

Los convertidores de energía de las olas se pueden clasificar atendiendo a distintos criterios [19]:

Según su posición relativa a la costa

Dependiendo del lugar donde el WEC se ubique, puede estar:

- situado en la costa.
- sumergido en aguas poco profundas.
- flotando en aguas poco profundas.
- sumergido en aguas profundas.
- flotando en aguas profundas.

Los dispositivos costeros se colocan en el litoral. Por tanto, su instalación y mantenimiento son sencillos. Además, no requieren anclajes en las profundidades, ni largos cables eléctricos submarinos. Sin embargo, la potencia que transporta la ola es mucho menor. Estos sistemas podrían presentar el inconveniente de que su ubicación estuviese limitada por las exigencias del litoral, como por ejemplo: la forma del acantilado, la preservación de paisaje costero, etc.

Los dispositivos de alta mar (aguas profundas) explotan las olas de más potencia. La profundidad de su ubicación debe ser superior a 40 metros. Su principal ventaja estriba en el mayor contenido energético de las aguas profundas. Por otro lado, presentan mayores dificultades en cuanto a ejecución de las instalaciones y supervivencia.

Según su posición relativa a la dirección del oleaje

En función del tamaño del dispositivo y de la orientación que adopte respecto al oleaje, los WECs pueden clasificarse en:

- Absorbedores puntuales, que son dispositivos generalmente simétricos respecto al eje vertical. Las dimensiones horizontales del sistema oscilante son pequeñas en comparación con la longitud de la ola incidente λ .

Los absorbedores puntuales suelen ser cilíndricos y reducidos; generalmente se colocan varios agrupados, formando una línea. Dentro de este grupo, se encuentran la Boya Masuda y el AWS.

- Atenuadores, que se caracterizan por colocarse en el eje paralelo a la dirección de la ola incidente, es decir, perpendiculares al frente de ola. Están preparados para captar y absorber la energía de modo progresivo, mediante largas estructuras orientadas de manera que su eje mayor permanezca paralelo a la dirección de propagación de las olas.

Están menos expuestos a daños y requieren menores esfuerzos de anclaje que los totalizadores, pues las fuerzas se compensan a ambos lados de la estructura, siendo capaces de captar energía por ambos lados de la misma. Dentro de este grupo se encuentra el Wavestar.

- Terminadores o totalizadores Los totalizadores se caracterizan por colocarse en el eje perpendicular a la dirección de la ola incidente, es decir, paralelos al frente de ola. Estos dispositivos no captan la energía de la ola progresivamente, sino de manera instantánea. Dentro de este grupo cabe destacar el rectificador Russel, el Pato Salter y la Balsa de Cockerell.

Según su principio dinámico de funcionamiento

Por su principio dinámico de funcionamiento, los WECs se pueden clasificar del siguiente modo:

1. Convertidores basados en el principio de la Columna Oscilante de Agua (con turbinas de aire).
2. Convertidores que aprovechan la energía potencial de la ola (con turbina hidráulica de pequeño salto).
3. Cuerpos Oscilantes.

Los dos primeros grupos pueden a su vez clasificarse en estructuras fijas o flotantes, mientras que el tercer grupo puede clasificarse en estructuras flotantes o sumergidas, con movimientos de rotación o de traslación. A continuación, cada uno de los dispositivos se irá describiendo en detalle siguiendo la clasificación indicada en la figura 2.3.

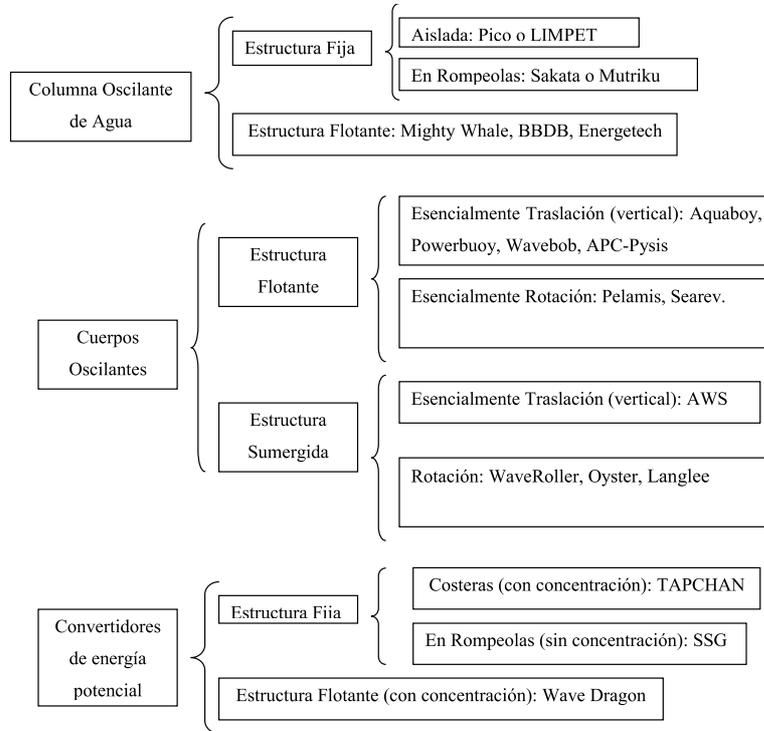


Figura 2.3: Clasificación de WECs según su principio de funcionamiento

Según otros criterios

Los WECs también se pueden clasificar en función de otros criterios, en los que se tiene en cuenta la simetría, la capacidad de almacenamiento de energía, la capacidad de control, la supervivencia en tormentas, el impacto medioambiental, la complejidad de la tecnología, materiales, eficiencia, mantenimiento, etc.

2.4.3. Tipos de convertidores

Convertidores basados en la columna oscilante de agua (OWC)

El sistema OWC consiste en una cámara abierta al mar, que encierra un volumen de aire que se comprime y expande por la oscilación del agua inducida por el oleaje. El aire circula a través de una turbina que puede ser bidireccional [20].

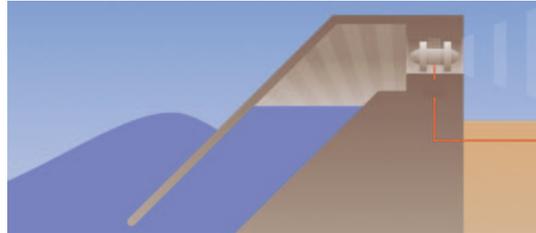


Figura 2.4: Ilustración del OWC

Existen varios prototipos de OWCs neumáticos, algunos de ellos a escala real. Uno de los OWC comercializados es el destinado a suministrar electricidad a los sistemas de iluminación de boyas de navegación. Su popularidad se debe a su aparente simplicidad por cuanto convierte las velocidades bajas y fuerzas altas del oleaje, en un flujo de aire de alta velocidad y baja fuerza, aptos para la alimentación del sistema de generación.

La eficiencia de extracción de la energía del oleaje, y su conversión en electricidad, son factores clave que influyen en la economía del sistema.

Los OWCs pueden instalarse en la costa o en aguas profundas. Suelen utilizarse turbinas Wells [21], caracterizadas por girar en el mismo sentido independientemente del sentido del flujo de aire. Además, recientemente se están investigando unas turbinas autorectificadoras, conocidas como turbinas de impulso [22].

A continuación, se citan diversos ejemplos:

1. OWCs fijos:

- El proyecto OWC Nereida aplica la tecnología OWC (Oscillating Water Column), utilizando para ello turbinas Wells en un rompeolas construido en Mutriku (Guipúzcoa, País Vasco). La solución técnica adoptada en este caso, consiste en 16 columnas oscilantes de agua, disponiéndose de una longitud total de rompeolas, de unos 100 metros. Para lograr una potencia generada aceptable, cada turbina aportaba 15 kW, siendo la potencia total instalada del orden de 250 kW.

- el Mk3PC fue instalado en Port Kembla el 26 de febrero de 2010 (Australia). Desde marzo de 2010, ha estado conectado a la red eléctrica. La potencia promedio entregada a la red varía dependiendo de las características del oleaje. En general cada unidad WEC es capaz de suplir las necesidades eléctricas de unos 600 hogares y de ahorrar alrededor de 4.400 toneladas de dióxido de carbono, lo cual puede variar dependiendo del oleaje y del consumo promedio de electricidad en cada ubicación.
- El Art Osprey es un OWC de forma semiesférica de 20 metros de altura, que contiene dos cámaras de aire. Este dispositivo se colocó en el fondo del mar, a unos 18 m de profundidad, tiene su salida equipada con dos turbinas tipo Wells y generadores en posición vertical. La estructura de la cámara está formada por elementos metálicos, montados en la costa; su fijación al fondo del mar se efectuó por balasto de sedimentos y hormigón. El primer prototipo (OSPREY I) fracasó por problemas durante la instalación, cerca de Dounreay, Escocia (1996). El OSPREY II funcionó a una profundidad de 15 m, a 1 kilómetro de la orilla, y generó hasta 2 MW de potencia.
- El OWC Kvaerner se instaló en Toftestallen, Noruega, con una potencia de 500 kW. El dispositivo operó durante tres años satisfactoriamente, antes de que fuera destruido por un fuerte temporal. Fue construido en un acantilado vertical de 30 m, y consistía en una base de hormigón y un tubo metálico de 10 m de diámetro. En la parte superior del tubo, se instaló un grupo en vertical con turbina tipo Wells. Las olas penetraban por la parte inferior del cilindro y desplazan hacia arriba la columna de aire, lo que impulsaba una turbina instalada en el extremo superior del tubo. Esta central abastecía a una aldea de 50 casas.
- El OWC de Madrás se construyó en la costa de Kerala, cerca de Trivandrum, en la India, y su potencia instalada asciende a 150 kW. El dispositivo está formado por cámaras. Cada una de ellas, consiste en un cajón de hormigón fabricado en dique seco y, posteriormente, anclado en la parte exterior de un rompeolas; las cámaras se llenaron de arena; la estructura soporta el impacto de olas de hasta 7 m; la turbina es de tipo Wells de eje vertical, con un rotor de 2 m de diámetro.
- El OWC Sakata, construido en 1989, consta de cinco cámaras que

forman parte del rompeolas de un puerto, y tiene forma de cajón, de (20 x 18) m. Se ha fabricado en dique seco y se ha anclado al fondo del mar, mediante balasto de arena; la sala de máquinas alberga una turbina Wells y un turbogenerador de 60 kW.

- El OWC de Kujukuri fue instalado en Kujukuri-Cho, Japón, y consta de diez OWCs de 2 m de diámetro y 2 m de altura, con una potencia de 30 kW; está ubicado en un antiguo rompeolas.
- El OWC de Pico fue construido en Pico, en las islas Azores, y consta de un canal natural en la costa. Dicho canal concentra la energía del oleaje hacia el dispositivo generador, que consiste en una cámara o cajón de hormigón fabricada en dique seco de (12 x 8) m; lleva una turbina hélice de 0,4 MW, que acciona un generador eléctrico.
- El OWC de China fue construido por el Instituto de Conversión de la Energía de Guangzhou, en la costa de la isla de Dawanshan. Sus dimensiones fueron de (4 x 10) m y su potencia asciende a 30 kW.
- El OWC Energetech fue desarrollado en Australia y concentra la energía de la ola mediante un colector. Se construyó una central undimotriz de 500 kW con estas características en el Puerto de Kembla, a 80 kilómetros al sur de Sydney.
- El OWC Limpet (Land Installed Marine Powered Energy Transformer). Fue desarrollado primeramente en Irlanda, mediante un prototipo de 75 kW, y posteriormente fue construido a la isla de Islay, Escocia, en 1991. El sucesor de este prototipo, de 500 kW, se utilizó para analizar e intentar solventar algunos obstáculos que dificultan la comercialización de dispositivos OWC. Este dispositivo utiliza las ventajas propias de las turbinas Wells. La central fue inaugurada en la isla de Islay, en noviembre de 2002 [5].
- La bolsa de Lancaster consiste en una estructura de hormigón, con forma de buque, que contiene bolsas flexibles, llenas de aire, colocadas a lo largo de la estructura. Las olas actúan lateralmente sobre las bolsas flexibles de forma que, aprovechando la situación de las crestas y valles de las olas, y mediante un sistema de válvulas, provocan el accionamiento de unas turbinas de aire convenientemente colocadas.
- El péndulo es un dispositivo apto para ser instalado en un rompeolas. Consiste en una cámara fabricada de hormigón, de forma que el frente enfocado hacia el mar está provisto de una

placa rígida de acero, articulada en su parte superior, que puede oscilar libremente. Las oscilaciones de la placa debidas al oleaje se transmiten y absorben por un dispositivo oleohidráulico, cuya eficiencia se estima en un 20 %.

2. OWCs flotantes:

- La OWC Sanze (Japón) fue probado en 1984. En su interior tiene un sistema que actúa por el principio de cavidad resonante. Las olas provocan las oscilaciones de la columna de agua, y comprime el aire. Éste, a su vez, acciona una turbina. La turbina es tipo Wells con un generador de 40 kW.
- El Backward Bent Duct Buoy (BBDB) fue inventado por Masuda (1986) y se trata de un WEC flotante basado en tecnología OWC, en donde el acceso del agua para formar la columna de presión, se produce por el lado opuesto a la ola incidente. Para ello, dispone de una cámara o conducto con forma de L invertida.
- La Ballena Poderosa (Mighty Whale) es un dispositivo OWC diseñado para trabajar en alta mar desarrollado en Japón. Consta de tres columnas OWC en serie y se puso en funcionamiento en 1998 generando 110 kW, a 1,5 kilómetros de la Ciudad Nansei. Las cámaras de aire convierten la energía de las olas en energía neumática. La ola, al ascender y al descender, origina variaciones del nivel del agua en el interior de cada compartimento, forzando una circulación de aire bidireccional a través de una turbina de aire. La novedad de este OWC es un componente estabilizador que reduce su tendencia de movimientos giratorios sobre la superficie del agua, por lo que puede resistir olas provocadas por vientos huracanados. Tiene una alta eficacia, estimada en un 60 %, y tan sólo debe resistir pequeñas fuerzas de anclaje.
- El buque Kaimei es una estructura flotante similar a un barco, que alberga varios tipos de turbinas para sistemas OWC. El barco, anclado en la costa japonesa, estaba conectado a ésta mediante un cable submarino para el transporte de la energía; tenía 80 metros de eslora y 12 metros de manga. Cuando la ola ascendía, empujaba la columna de aire que tenía encima de sí. Un juego de válvulas, cada una de las cuales tan sólo abría en un sentido, obligaba a que dicho aire sólo pudiese abandonar la cavidad resonante tras pasar por la turbina. Cuando la ola descendía, se creaba una succión en la



Figura 2.5: La Ballena Poderosa

cámara resonante que obligaba al aire a entrar en la cavidad desde el exterior, siguiendo la misma trayectoria. Su potencia máxima ascendía a 2 MW.

- El *SperboyTM* consiste en una boya flotante cuya parte inferior se encuentra sumergida. En la parte superior de la boya se ubican las distintas instalaciones: turbinas, generadores e instalaciones necesarias. Su funcionamiento es similar al de los OWC de tierra, pero:
 1. el dispositivo puede ubicarse en aguas profundas, donde las olas contienen más energía.
 2. Toda la estructura a flote mantiene las interacciones óptimas hidrodinámicas para aprovechar la ola dominante en cada instante.Tan sólo son móviles las partes ubicadas por encima del nivel del mar, por lo que las tareas de mantenimiento se reducen al mínimo. Actualmente se busca ampliar hasta 50 años la vida útil del convertidor y aumentar la potencia producida. Las dimensiones dependen de las condiciones del mar en el sitio de despliegue. Podría llegar a tener un diámetro de 30 metros y una altura de 50 metros.
- El OWC CLAM es una estructura flotante de forma toroidal de 60 m de diámetro y 8 m de altura. La estructura base es de acero u hormigón, y lleva montadas sobre la cara exterior 12 células de aire, formadas por membranas de goma reforzada, de 15 m de ancho y 7,5 m de alto. Las membranas son deformables por la acción del oleaje. Tres cuartas partes aproximadamente de las membranas

Figura 2.6: *Sperboymarine*TM

están sumergidas. El interior de las membranas contiene aire a una presión 15 kPa. Una central undimotriz compuesta de 5 unidades, proporcionaría un total de 12,5 MW. Cuando la ola choca con la membrana, su volumen disminuye y hace circular el aire dentro de ella, a través de una tubería, hacia las otras membranas. Cada unidad contiene 10 turbinas tipo Wells de 250 kW. La disposición circular de las membranas tiene la ventaja de que el oleaje se puede aprovechar desde cualquier dirección.

- El dispositivo OWC blueWAVE [23] contiene seis columnas oscilantes de agua y se ubica en aguas profundas. Se trata de un dispositivo flotante de acero, que se ancla al fondo marino en aguas cuya profundidad varía entre 40-80 m aproximadamente. Agrupando OWCs, se consigue reducir la infraestructura eléctrica requerida, lo que implica una reducción del coste y un aumento de eficiencia. La potencia promedio de salida del dispositivo se encuentra alrededor de los 3 MW.

Cuerpos Oscilantes

Los WECs oscilantes aprovechan la energía de la ola para adquirir un movimiento oscilatorio. Dicho movimiento conlleva una energía mecánica que se transforma en otro tipo de energía, generalmente eléctrica.

1. Cuerpos oscilantes sumergidos:

- El Waveroller [24] es un WEC oscilante, rotativo y sumergido, que



Figura 2.7: Dispositivo Bluewave

captura la energía cinética del agua del fondo del mar. A medida que aumenta la profundidad del mar, la elipse que describen las partículas de agua para propagar la ola, se vuelve cada vez más pronunciada. Cerca del fondo del mar, dicha elipse pasa a ser un movimiento rectilíneo de vaivén, es decir, una oscilación hacia delante y atrás. La energía cinética contenida en el movimiento de esta masa de agua cercana al fondo del mar es la aprovechada por dispositivos como el Waveroller. El dispositivo consiste en una placa anclada al fondo del mar por su parte inferior, de 3,5 x 4,5 metros, que pesa 20 toneladas y se sitúa cerca de la costa, a profundidades comprendidas entre 10 y 15 metros. El movimiento hacia adelante y hacia atrás provocado por las olas en el fondo marino, mueve las placas y la energía cinética se puede convertir en electricidad mediante un circuito cerrado, que incluye una bomba de pistón, aceite como fluido de trabajo y motor hidráulico. Al ser un dispositivo modular, la capacidad de la central undimotriz aumenta a medida que se conectan más módulos. Cada módulo está compuesto por un número de elementos que oscila entre 3 y 5. Una sola placa de producción puede generar una potencia aproximada de 13 kW. Conectando módulos de placas, se formará una central undimotriz. El prototipo a escala real completo (automatización, electrónica de potencia, elementos hidráulicos y sistema de extracción de potencia) se está probando en Peniche (Portugal). La potencia instalada será de 300 kW.

- El Oyster [25] es un convertidor de energía de las olas que consiste

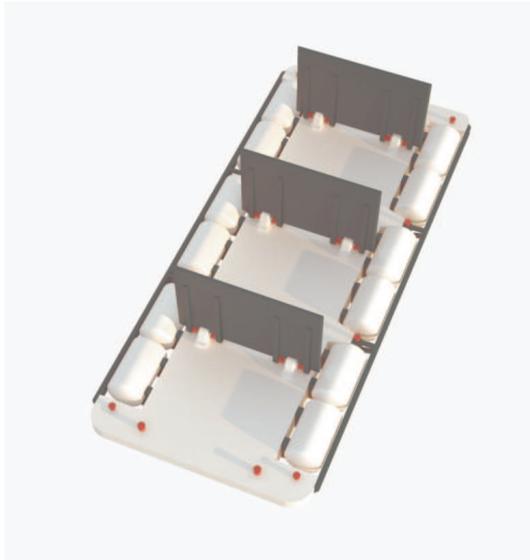


Figura 2.8: Convertidor Waveroller

en un módulo oscilante, de 18m x 12m x 2m, fijado al fondo del mar cerca de la costa, a unos 12 metros de profundidad. Dicho dispositivo acciona pistones dobles, que a su vez, entregan el agua del mar presurizada a una unidad hidroeléctrica terrestre, de manera similar a como sucede con los generadores hidroeléctricos convencionales. Se trata por tanto del equivalente marino de una central eléctrica hidráulica. La energía máxima generada por cada unidad de Oyster oscila entre 300 y 600 kW, dependiendo de su localización y configuración. Una central undimotriz que integre 10 módulos de Oyster, podría llegar a generar 6 MW. El Oyster es silencioso, no contiene sustancia tóxica alguna y se puede montar y desmontar en 24 horas. La simplicidad del diseño y su localización cercana a la costa, facilitan la accesibilidad, y por tanto, el mantenimiento. Además, es ligero y tiene muy pocos componentes. Por otro lado, el dispositivo no se ve sometido a las fuerzas violentas que se

encuentran mar adentro y su impacto ambiental es mínimo. El primer prototipo a escala real fue instalado en el centro de energía marina europeo (EMEC) en Orkney (Escocia), en verano de 2009, y fue conectado a red en noviembre de 2009. La empresa ha comenzado las pruebas de funcionamiento de la segunda generación del WEC y su producción eléctrica ya ha sido conectada a red.



Figura 2.9: Montaje del Oyster



Figura 2.10: Oyster en funcionamiento

- El WEC flotante Langlee [26] es una estructura de acero flotante que consta de dos grandes aletas verticales que oscilan movidas por el oleaje. Las aletas se acoplan directamente a generadores que convierten esta energía mecánica en eléctrica, la cual se envía a la red mediante un cable eléctrico. El diseño de este WEC es modular,

con el fin de poder ser ampliado en una matriz que proporcione varios megavatios de potencia.

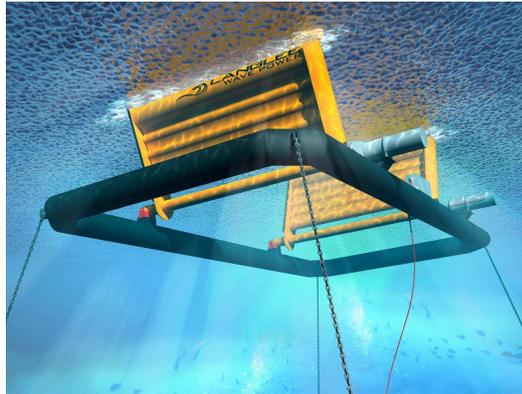


Figura 2.11: Convertidor de energía de las olas Langlee

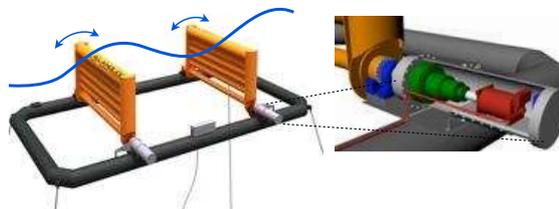


Figura 2.12: Descripción del WEC Langlee

2. Cuerpos oscilantes flotantes:

- La máquina Wavestar [27] no se opone transversalmente al movimiento de la ola para absorber su energía, sino que se orienta perpendicularmente a ella. De esta manera, las olas se armonizan con la longitud de la máquina, y la absorción se produce de manera continua. En ambos lados de la máquina hay flotadores que se sumergen parcialmente en el agua. Cuando llega una ola, el primer flotador se levanta. A continuación, se levantará el segundo y

así sucesivamente, entregando energía a lo largo de toda la longitud de la máquina. Cada uno de los flotadores está asociado a su propio cilindro hidráulico. Cuando se levanta un flotador, un pistón presiona y bombea aceite hacia el colector común de la transmisión de la máquina. El aceite a presión acciona un motor hidráulico, que está conectado con el generador eléctrico. Como la longitud de la máquina es varias veces superior a la longitud de la ola, los flotadores funcionarán continuamente absorbiendo energía. La máquina se coloca sobre una estructura en el fondo del mar, a una profundidad de 7 a 30 metros. La producción de energía eléctrica se detiene si las olas exceden de 8 metros (tormenta). Un prototipo de 500 kW, fue instalado en Hanstholm (Dinamarca) en 2009, y fue conectado a red en 2010.



Figura 2.13: Funcionamiento normal del Wavestar

- El WEPTOS [28] es un convertidor flotante capaz de regular la entrada de energía de las olas y reducir el impacto en condiciones climáticas adversas. La estructura en forma de V absorbe la energía de las olas a través de una línea de elementos cuya forma está basada en el WEC Pato de Salter, que transmiten la energía a un eje común, directamente conectado al generador. De este modo, se consigue generar energía de manera uniforme a medida que la ola avanza. El ángulo de la estructura del WEPTOS es lo que determina su exposición a las olas. Cuando las olas son pequeñas y con poca energía, es necesario ampliar la zona de extracción. En cambio, con aguas turbulentas es preferible una extensión menor a fin de

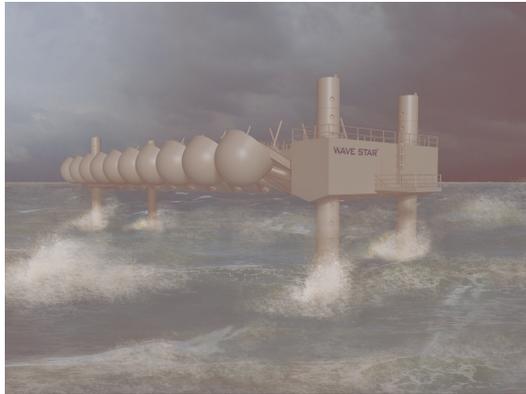


Figura 2.14: Posición de supervivencia del Wavestar

asegurar unos niveles óptimos de extracción de energía y evitar que éstos superen la capacidad del generador.

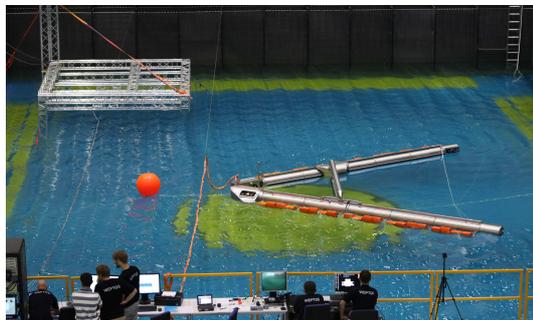


Figura 2.15: Convertidor WEPTOS

- El Pelamis [29] es un WEC consistente en una estructura articulada y semisumergida, compuesta por secciones cilíndricas que se unen mediante rótulas. El movimiento que provoca la ola en estas uniones, es absorbido por bombas hidráulicas que, a su vez, bombean aceite a alta presión hacia los motores hidráulicos. El pelamis comprende cuatro segmentos de 24 metros de longitud cada uno, entre los cuales existen tres cilindros en los que se produce la electricidad. El oleaje provoca el movimiento en las articulaciones de la serpiente,

que puede girar tanto en el plano vertical, como en el horizontal. Vástagos colocados a la altura de las articulaciones y protegidos del agua por un manguito flexible, se desplazan al ritmo del oleaje y accionan bombas de aceite. Las bombas conducen el aceite a presión hacia un depósito, y de allí, hacia un motor hidráulico de forma continua en el que la energía de presión del aceite, se transforma en energía mecánica en el eje del motor, que a su vez se encuentra acoplado a un alternador para producir electricidad. La corriente eléctrica se transporta hacia la costa mediante un cable submarino, donde se enlaza con la red eléctrica. Su rendimiento está comprendido entre el 70 % y el 80 %. Su sistema de anclaje flexible, sujeta el extremo de la máquina al fondo, y obliga al dispositivo a quedarse frente a las olas, dejándole bastante holgura para poder oscilar. La potencia instalada de los proyectos que se están desarrollando oscila entre 10-50 MW.



Figura 2.16: Convertidor Pelamis

- El WEC correspondiente al proyecto de Lysekil [30] se encuentra situado cerca de la costa este de Suecia. Consiste en un generador lineal, accionado directamente mediante una boya esférica que oscila en la superficie. La boya se encuentra unida a las partes móviles del generador, cuyo conjunto se denomina traslator, sobre el cual se montan los imanes permanentes. Cuando el traslator se mueve en relación al estator fijo, se induce tensión en los devanados del estator [31]. El traslator también está unido a potentes resortes que, a su vez, se anclan a cimentaciones de hormigón realizadas en el fondo del mar. Dichos resortes almacenan energía durante la cresta de la ola, y actúan como fuerza de restauración en los valles de la misma [32].

Se conectó un sensor de fuerza entre la boya y los resortes para estudiar la interacción entre ellos. El dispositivo se ubicó a una profundidad de 25 metros, y se conectó a una estación de medida mediante un cable marino de 3 Km. La estación de medida se encuentra equipada con una carga resistiva donde se consume la energía producida por la central undimotriz. Con la ayuda de electrónica de potencia, la potencia alterna generada se convierte en corriente continua, y se traslada a tierra mediante cableado eléctrico. Posteriormente, se inyecta en la red eléctrica mediante un convertidor DC/AC.

- También se ha desarrollado un generador lineal de imanes permanentes en Oregón para convertir el movimiento lineal de las olas en energía eléctrica [33]. El dispositivo se ha probado tanto en el mar como en un banco de ensayos.

Se trata de un absorbedor puntual de 1 kW de potencia nominal. Tiene tres componentes principales: el eje, el flotador y el generador. El eje cilíndrico mide aproximadamente 3.3 metros de altura y 0.6 metros de diámetro. Dicho cilindro está unido a una placa de reacción que cuelga por debajo, y que le mantiene sin movimiento en el mar.

El flotador es un cilindro exterior que mide 2.3 metros de altura y 1.3 metros de diámetro, y que se mueve libremente en respuesta a la fuerza del oleaje. El generador tiene dos componentes principales: los imanes permanentes y los arrollamientos de la armadura. Los imanes se sitúan en la parte interior del flotador, y la armadura en el diámetro exterior del eje. Cuando el generador se mueve en respuesta a la ola, los imanes se desplazan a lo largo de los arrollamientos de la armadura, induciendo tensión.

Esta tesis versa sobre los absorbedores puntuales.

Convertidores basados en la altura de la ola

Los convertidores basados en la altura de la ola, transforman en energía eléctrica, la energía potencial almacenada en la masa de agua que adquiere altura para formar la ola. Pueden ser de estructura fija (Rectificador de Russel o el SSG) o de estructura flotante (Wave Dragon o Wave Plane).

1. Convertidores fijos basados en la altura de la ola

- El SSG (Sea-wave Slot-cone Generator) [34] fue desarrollado en el año 2004. El concepto SSG se basa en almacenar el agua de las olas entrantes en depósitos que se encuentran a una cota superior al nivel del mar. Dichos depósitos se colocan uno encima de otro, para así retener la energía potencial de la masa de agua que portan las olas entrantes, en sus distintas cotas. La ola entrante recorrerá cuesta arriba una pendiente y, a su regreso, el agua marina caerá en los distintos depósitos. Desde estos depósitos, el agua capturada pasará a través de una turbina multi-etapas. El SSG está formado por una estructura robusta, siendo sus únicas partes móviles el eje de la turbina y las puertas que controlan el flujo de agua. La turbina gradual o multi-etapas MST (Multi Stage Turbine) tiene la ventaja de poder aprovechar las distintas alturas a la que se encuentran los distintos depósitos, vertiendo el agua que contienen sobre un rodete de turbina común. La tecnología gradual reducirá al mínimo el número de arranques y paradas de la instalación, por lo que aumentará la vida útil de la instalación. El SSG puede ser ubicado en un rompeolas, construyéndose primero en tierra, y remolcándose posteriormente hasta situarlo adecuadamente. Se podría construir una planta comercial integrada en una estructura de rompeolas. Existen planes para la construcción de plantas piloto en Svaahaia (Noruega), Hanstholm (Dinamarca) y Garibaldi (Oregon, USA).



Figura 2.17: Convertidor SSG en rompeolas

2. Convertidores basados en la altura de la ola flotantes:

- El Dragón de Ola [35] es un convertidor de energía de las olas preparado para trabajar en alta mar, y fue desarrollado en Dinamarca. Este dispositivo utiliza un reflector para concentrar

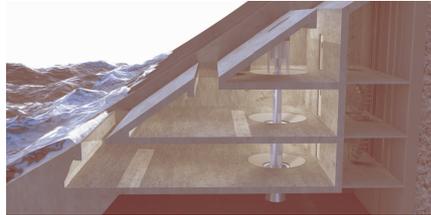


Figura 2.18: Sección transversal del SSG

la ola hacia una rampa y llenar un depósito situado en la parte superior, por encima del nivel de mar. El agua contenida en el depósito superior está cargada de energía potencial y se turбина con el fin de generar energía eléctrica. Las turbinas utilizadas, que son las únicas partes móviles del dispositivo, son del tipo Kaplan. Se puede generar electricidad para 40.000 ó 60.000 hogares, con 7 unidades colocadas a lo largo de 4 km, lo que supone 40 ó 50 Mw. El dispositivo sobresale del agua siete metros, y penetra en ella 15 metros. Por ello, es necesario ubicarlo en aguas cuya profundidad supere los 25 metros, disminuyéndose además el impacto visual.



Figura 2.19: Convertidor Wave Dragon

- El Wave Plane nace en Dinamarca en 1994, y fue probado en Japón en septiembre de 2002. Este convertidor consiste en una construcción flotante con placas de diversas inclinaciones que reciben la ola. El agua que transporta la ola penetra en los compartimentos formados por las placas, y a continuación, baja

en espiral giratoria pasando a través de una turbina y regresando al mar. El tiempo necesario para que el agua entrante se devuelva al mar, es aquél que permite que la turbina gire con velocidad regular entre olas consecutivas. El sistema aprovecha tanto la energía cinética como la potencial. El rendimiento varía entre el 16% y el 32%, dependiendo de las características del oleaje.

2.5. Técnicas de control aplicadas a los WECs

La proliferación de la industria que busca aprovechar la energía contenida en mares y océanos ha dado lugar a una gran variedad de dispositivos [36]. Este trabajo versa sobre los WECs basados en tecnología de cuerpo oscilante, y concretamente en los denominados absorbedores puntuales, que se definen como osciladores mecánicamente amortiguados relativamente pequeños, activados por el oleaje. Estos dispositivos constan de dos subsistemas: el sistema oscilante y el sistema de extracción de potencia. El sistema oscilante interactúa directamente con el oleaje y determina las características hidrodinámicas del WEC ([18], capítulo 5). Por otro lado, el subsistema de extracción de potencia convierte en energía eléctrica parte de la energía capturada del oleaje mediante el sistema oscilante.

Esta conversión de energía mecánica a eléctrica, puede conllevar conversiones intermedias a otros tipos de energía mediante la incorporación de circuitos neumáticos o hidráulicos. Los WECs de accionamiento directo realizan una conversión energética directa entre el sistema oscilante y el sistema de extracción de potencia, simplificando por tanto el diseño del dispositivo y reduciendo las pérdidas globales del sistema.

La energía primaria es de naturaleza pulsante, por lo que la potencia suministrada por los WECs presenta fluctuaciones tanto en frecuencia como en tensión a la salida del generador eléctrico. Por tanto, la energía eléctrica debe ser adecuadamente adaptada antes de ser inyectada a la red eléctrica.

La estrategia de control afecta significativamente a la eficiencia global del sistema y a las especificaciones del diseño global. El control reactivo convencional que se describe a continuación, se ha considerado hasta ahora el control óptimo, centrándose en la extracción de potencia sin tener en cuenta las posibles afecciones a la máquina eléctrica. Quedará demostrado que, cuando se aplica dicho control, la máquina eléctrica puede llegar a absorber potencia de la red en promedio, lo cual es inadmisibles para una central de generación de energía eléctrica.

Control reactivo convencional

Las estrategias de *control reactivo* permiten intercambios de potencia bidireccionales entre la boya y el sistema de extracción de potencia. Por tanto, el sistema de extracción de potencia entrega energía al sistema oscilante durante parte del ciclo. Esta estrategia se aplicó inicialmente a oleaje regular [37, 38] y establece que teóricamente se puede aplicar una estrategia de control reactivo que permita al sistema de extracción de potencia absorber la máxima cantidad de energía.

Al igual que sucede en los circuitos eléctrico en serie, la resonancia mecánica ocurre en un absorbedor puntual cuando la suma de las componentes imaginarias de la impedancia total se anula (condición de amplitud). Por otro lado, la máxima transferencia de potencia ocurre cuando la impedancia del generador es igual a la conjugada compleja de la impedancia del dispositivo (condición de fase). Por tanto, como se comentará a lo largo de esta tesis, la impedancia del generador debe ser controlada para que se cumplan ambos requerimientos: el control de amplitud y el control de fase. En un generador eléctrico lineal, el control de amplitud requiere el control de una fuerza similar a la fuerza de amortiguamiento, mientras que el control de fase requiere el control de una fuerza que cuya naturaleza corresponda a un resorte.

De esta manera, el sistema oscilante trabaja en resonancia con el oleaje incidente. Sin embargo, la necesidad de flujo de potencia reversible conlleva dificultades en la implementación teórica y práctica del control reactivo.

Posteriormente, el control reactivo se formuló para oleaje irregular ya que esta estrategia no puede ser implementada en oleaje irregular debido al desconocimiento de los valores futuros de la velocidad del dispositivo o de la fuerza de excitación [39, 40]. Por lo tanto, se hace indispensable aplicar estrategias de control subóptimo, como el control complejo conjugado aproximado (ACC), donde los parámetros de control se ajustan para una frecuencia de oleaje incidente determinada [41, 42].

Una limitación práctica del control reactivo, especialmente cuando las condiciones de oleaje se alejan de la frecuencia natural del sistema oscilante, es que conlleva inaceptables cantidades de flujo de potencia bidireccional, que fluyen desde el sistema oscilante al sistema de extracción de potencia y viceversa. Por tanto, considerando un sistema de extracción de potencia no ideal, las pérdidas en el flujo bidireccional pueden dar lugar a un rendimiento global del sistema bajo, si se evalúa la energía útil producida [43].

Estos intercambios energéticos conllevan picos de potencia elevados, de manera que el dispositivo eléctrico y concretamente los convertidores de

potencia tendrían que ser significativamente sobredimensionados en caso de que se aplique una estrategia de control reactivo [14, 44, 45]. Además, estos flujos ocasionan una gran cantidad de pérdidas que pueden dar lugar incluso balances negativos en la potencia media transferida desde el sistema de extracción de potencia a la red. Finalmente, el control reactivo puede dar lugar a amplitudes de oscilación y velocidades del dispositivo poco realistas.

Esta tesis trabaja el control reactivo.

Control pasivo convencional

El *control pasivo*, también conocido como *control de carga resistiva* (RLC), es una estrategia de control que establece entre el sistema de extracción de potencia y el sistema oscilante una acción proporcional a la velocidad del último [46, 18]. De esta manera, es posible implementar un flujo de potencia unidireccional desde el sistema oscilante hacia el sistema de extracción de potencia.

El control pasivo fue investigado inicialmente en [47] modelando la fuerza ejercida por el sistema de extracción de potencia como una *resistencia de carga*, y presenta algunas ventajas frente al control reactivo:

- Flujo unidireccional en vez de bidireccional, lo que conlleva pérdidas moderadas.
- Picos de potencia aceptables.
- Amplitudes y velocidades del sistema oscilante aceptables.

Por tanto, la instalación resulta ser técnica y económicamente viable. Por ello, no sólo se contempla esta estrategia en algunos prototipos [48, 49], sino que además suele considerarse a la hora de valorar el rendimiento de las estrategias de control de WECs mediante comparativas [50, 18].

La principal desventaja del control pasivo estriba en los bajos niveles de potencia absorbida en el sistema de extracción de potencia, comparados con los obtenidos mediante otras estrategias.

Control latching

El control *latching* es una estrategia de control discreta y altamente no lineal.

El control latching pretende paliar las desventajas asociadas al control reactivo [38]. Estudios posteriores fueron realizados en [51, 52], donde se

demostró que aplicar control sobre el dispositivo en instantes discretos del ciclo de la ola es más beneficioso que aplicar control continuo, cuando las amplitudes están restringidas.

El control latching sólo cumple una de las dos condiciones de optimalidad: la condición de fase. Como no cumple la condición de amplitud, esta estrategia no trabaja el amortiguamiento.

El principio de funcionamiento es el siguiente: un mecanismo de sujeción detiene al WEC en el instante de excursión extrema (cuando su velocidad se anula). La fuerza necesaria para fijar el flotador depende de la amplitud y el periodo de la ola incidente. Transcurrido cierto tiempo (en torno a un cuarto del periodo natural) se envía una señal al mecanismo para que lo libere. La figura (2.20) muestra una descripción ideal del control latching [40].

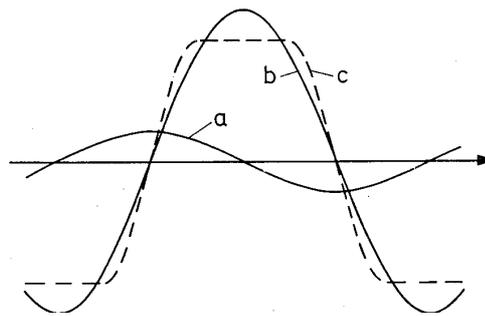


Figura 2.20: Control Latching. Desplazamiento vertical del sistema oscilante y elevación de la ola en función del tiempo

La curva *a* representa la elevación de la superficie de agua debida a la ola incidente, en el punto donde se ubica el cuerpo oscilante. La curva *b* representa el desplazamiento vertical del sistema oscilante cuya masa es lo suficientemente grande para que su periodo natural coincida con el del oleaje (resonancia). La curva *c* representa el desplazamiento vertical del sistema oscilante cuya masa, y por lo tanto periodo natural, son pequeños. El control latching siempre establece un flujo de potencia unidireccional desde el sistema oscilante al sistema de extracción de potencia. La implementación de esta estrategia en oleaje irregular requiere que se prediga a corto plazo el oleaje incidente con el fin de evaluar los intervalos de sujeción del sistema oscilante, y así conseguir que la fuerza de excitación máxima (o mínima) ejercida por la ola coincida con la velocidad máxima (o mínima) del WEC. Además, la técnica sólo muestra buenos resultados cuando la frecuencia natural del sistema oscilante es mayor que la frecuencia del oleaje incidente [53].

Conclusiones de la introducción a las técnicas de control

Un control de los WECs inadecuado puede hacer que el sistema oscilante se comporte en promedio como un motor en vez de un generador, y por lo tanto absorba potencia de la red eléctrica.

Nótese que las estrategias de control expuestas anteriormente buscan maximizar la potencia absorbida en el sistema de extracción de potencia, sin considerar las pérdidas. A la hora de valorar la eficiencia de las estrategias de control, es fundamental distinguir entre la potencia absorbida en el sistema de extracción de potencia y la potencia de salida del generador eléctrico, siendo ésta última la potencia verdaderamente útil [54].

Capítulo 3

El absorbedor puntual

El objetivo de este capítulo es realizar una descripción general del dispositivo WEC que es objeto de estudio en esta tesis. Se realiza un especial énfasis en las características hidrodinámicas que permiten modelar el comportamiento dinámico del mismo, dejando para el próximo capítulo una descripción más detallada de los componentes eléctricos del WEC.

Se comienza por realizar una descripción de los diferentes términos de flujos de potencia que caracterizan el funcionamiento de cualquier dispositivo WEC, los cuales permiten poner de manifiesto los diferentes intercambios energéticos que se producen en el proceso de conversión de la energía contenida en el oleaje en una energía útil. A continuación, se define y describe el absorbedor puntual utilizado en este trabajo y su modelo matemático, tanto en el dominio de la frecuencia como en el del tiempo.

3.1. Análisis de los flujos de potencia en los WECs

Las grandes variaciones que se producen continuamente en las características del oleaje, dan lugar a problemas en el diseño de máquinas y dispositivos que convierten la energía contenida en las olas, en otro tipo de energía. Estos sistemas deben captar la energía primaria, con características aleatorias, y convertirla eficientemente en otra forma de energía útil, generalmente energía eléctrica.

3.1.1. Etapas

Las etapas genéricas de un dispositivo WEC pueden ser:

- oleaje: sucesión continuada de olas que contiene la energía primaria que va a ser utilizada.
- interfase primaria: elemento al que la ola le transfiere su energía en primera instancia: la boya en los sistemas oscilantes, el aceite en los WECs oleohidráulicos, el aire en los sistemas basados en OWC o la columna de agua en los WECs de rebosamiento.
- sistema extractor de potencia: elemento utilizado para capturar energía procedente del oleaje. En el ámbito de esta tesis, el sistema extractor será la máquina eléctrica.
- evacuación: proceso de conversión y entrega de la energía. Por ejemplo, conversión a energía de presión para producción de agua potable en desaladoras, o, como en el caso de la presente tesis, conversión a energía eléctrica para ser evacuada a la red.

La figura 3.1 muestra estas etapas:

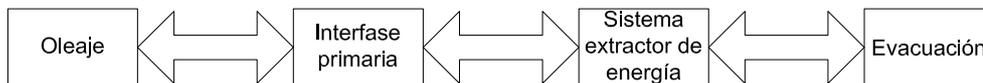


Figura 3.1: Etapas de conversión energética en un WEC

3.1.2. Flujos de potencia

A continuación, se describen los pasos requeridos entre etapas para convertir la potencia del oleaje en potencia útil:

- Primer paso: la potencia fluye entre la ola y la interfase primaria, produciéndose la potencia interceptada. Dicho flujo puede ser bidireccional, es decir, durante partes de los ciclos de oscilación, el dispositivo entrega energía al mar, y el tiempo restante intercepta energía procedente de él. Esta característica es una diferencia fundamental respecto a los parques eólicos, donde el sistema de extracción no devuelve energía al entorno con la finalidad de mejorar las condiciones de extracción.

- Segundo paso: la potencia fluye entre la interfase primaria y el sistema de extracción de potencia. Dicha potencia se denomina potencia capturada. También en esta etapa puede tener lugar un flujo de potencia bidireccional entre la interfase primaria y el sistema extractor de potencia. En el caso de que el sistema extractor de potencia sea un generador eléctrico, cuando éste transfiera energía a la interfase primaria, la máquina eléctrica funciona como motor, absorbiendo energía eléctrica de la red.
- Tercer paso: La potencia capturada en el paso anterior, no es adecuada para ser transmitida o consumida. Por ello es necesario regular o acondicionar dicha potencia. En el tercer paso, la potencia fluye entre el sistema de extracción de potencia y el convertidor de potencia, dando lugar a la potencia entregada.

Mientras se transfiere potencia en estos tres pasos, el WEC puede ejecutar las siguientes acciones, encaminadas a posibilitar el proceso [41]:

- Multiplicador: conversión del movimiento inducido por la ola, caracterizado por bajas velocidades y altas fuerzas, en un movimiento adecuado para la generación eléctrica.
- Rectificador: conversión del movimiento bidireccional en movimiento unidireccional.
- Limitador: restricción de las fuerzas que exceden los límites de diseño.
- Almacenamiento: esta etapa acontece durante la conversión del flujo de potencia aleatorio o cíclico, en una potencia de salida con forma de onda adecuada. Si se produce antes de la conversión eléctrica, suelen utilizarse acumuladores de presión o volantes de inercia. Si se produce después, suelen utilizarse condensadores.

Estas funciones se pueden implementar en cualquier etapa, dependiendo del WEC que se considere.

3.1.3. Tipos de potencia

Atendiendo a las definiciones realizadas en los apartados anteriores (ver figura 3.1), se debe distinguir entre:

- potencia del oleaje asociada al contenido energético de las olas (energía primaria).
- potencia interceptada: La potencia que el WEC es capaz de captar procedente del oleaje.
- potencia capturada: porción de la potencia interceptada que el WEC transforma mediante el sistema de extracción de potencia en una forma energética más sencilla de manejar, devolviendo la cantidad restante al mar (potencia radiada).
- potencia entregada: porción de la potencia capturada que el WEC entrega, y por tanto, la potencia útil de salida del sistema de extracción de potencia.

Si no existiese sistema de extracción de potencia, toda la potencia interceptada se devolvería al mar. Dicho de otro modo, si la única fuente de amortiguamiento fuese la radiación (sin sistema de extracción de potencia ni pérdidas), la potencia interceptada sería igual a la potencia radiada.

Sin embargo, cuando existe sistema de extracción de potencia, parte de la potencia interceptada se convierte en potencia capturada por el sistema de extracción de potencia, y parte se devuelve al mar en forma de olas radiadas.

3.2. Definición de absorbedor puntual

Un absorbedor puntual es un WEC oscilante, excitado por las olas, cuyas dimensiones en planta son mucho menores que la longitud de la ola incidente. Dichos dispositivos suelen instalarse formando un conjunto de varias unidades, a pocos kilómetros de la costa.

Hasta mediados de los años 70, uno de los dispositivos más valorados para el aprovechamiento de la energía undimotriz era el pato de Salter. Fueron Budal y Falnes [47] quienes primeramente propusieron un absorbedor puntual para dicho aprovechamiento. Actualmente, hay distintos prototipos que se encuentran en funcionamiento, como el proyecto de Lisekyl [30], Oregon [33] y Santoña [55], utilizando estos dos últimos proyectos, dos cuerpos flotantes para su funcionamiento.

Los absorbedores puntuales presentan las siguientes ventajas [56, 57]:

- Comparados con otros WECs, los absorbedores puntuales poseen elevados ratios de potencia absorbida frente al volumen estructural del dispositivo.

- También son atractivos desde el punto de vista del modelado, ya que el oleaje disperso puede despreciarse y las fuerzas sobre el dispositivo se deben únicamente al oleaje incidente.
- Cuando la frecuencia natural del WEC está próxima a la frecuencia pico del oleaje, un absorbedor puntual puede capturar mayor cantidad de energía de la ola que la que le corresponde por su propia anchura, lo cual WECs de mayores dimensiones no pueden cumplir.

Por otro lado, los absorbedores puntuales presentan las siguientes desventajas:

- Elevados requerimientos de anclaje.
- Los WECs son activados por oleajes reales cuya frecuencia puede variar en un amplio margen. Por tanto, las características del dispositivo deben ajustarse al estado del oleaje para conseguir la máxima extracción energética. El ancho de captura de los absorbedores puntuales es especialmente reducido, debido a que sus dimensiones físicas son pequeñas comparadas con la longitud de la ola incidente. Por ello, requieren un control más exacto y sofisticado del movimiento oscilante.
- Su capacidad de sobrevivir en ambientes tormentosos es cuestionable.

3.2.1. Absorbedor puntual de accionamiento directo mediante generador lineal

A continuación se describe el absorbedor puntual de accionamiento directo mediante generador lineal. No requieren circuito hidráulico ya que un cuerpo oscilante, generalmente una boya, acciona directamente un generador. La configuración correspondiente a la figura 3.2 corresponde al proyecto de Lysekil, cuyas características se han utilizado en esta tesis.

Como se puede observar, la figura muestra un esquema general donde se indican las distintas partes de este absorbedor puntual.

La primera etapa abarca el sistema oscilante, que consiste en una boya, el traslator del generador lineal y resortes unidos al traslator cuya finalidad es doble: almacenar energía y, simultáneamente, actuar como fuerza tensora en los valles de las olas [58].

La segunda etapa corresponde al sistema de extracción de potencia, que convierte la potencia extraída de las olas en potencia eléctrica. Este proceso de conversión es bidireccional cuando se aplica la estrategia de control reactivo. En

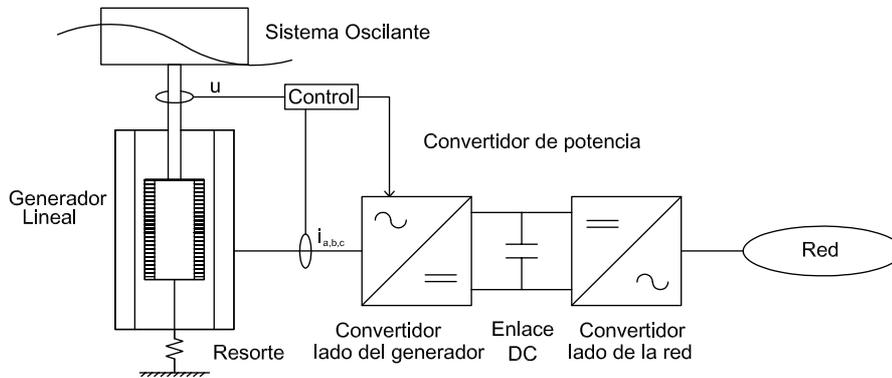


Figura 3.2: Esquema general de un absorbedor puntual de accionamiento directo para la conversión de energía de las olas

la siguiente etapa, la potencia de las olas capturada por el sistema de extracción de potencia se intercambia con el convertidor electrónico de potencia. Aquí, el proceso de conversión también es bidireccional cuando se aplica la estrategia de control reactivo. En otra etapa, el condensador ubicado entre los dos convertidores, absorbe la diferencia de potencia activa instantánea que existe entre los dos convertidores, y trabaja como una fuente de tensión para los convertidores. En la última etapa, el convertidor electrónico de potencia transfiere la potencia eléctrica a la red, en condiciones adecuadas de calidad de onda.

3.3. Modelo dinámico del absorbedor puntual

Se asume que el dispositivo puede moverse sólo verticalmente, teniendo los restantes grados de libertad idealmente restringidos. Además, las amplitudes del oleaje y las oscilaciones se consideran lo suficientemente pequeñas como para que la teoría lineal se considere una buena aproximación. Aplicando la segunda ley de Newton:

$$f_e(t) + f_{pto}(t) + f_r(t) + f_s(t) = ma(t) \tag{3.1}$$

donde

- $f_e(t)$ es la fuerza de excitación producida por el oleaje incidente.
- $f_{pto}(t)$ es la fuerza que el sistema de extracción de potencia aplica al cuerpo oscilante.
- $f_r(t)$ es la fuerza de radiación debida a las olas radiadas que se originan cuando el cuerpo se mueve.
- $f_s(t)$ es la fuerza neta de restauración (resorte), y es igual a la diferencia entre la fuerza gravitacional y la de flotación.
- m es la masa del sistema oscilante e incluye todas las partes móviles del generador.
- $a(t)$ es la aceleración vertical del sistema oscilante.

En la expresión anterior se ha considerado que la interacción entre la boya y el agua se puede descomponer en la fuerza de excitación, la fuerza de radiación y la fuerza de flotación [59]. A continuación se describen con más detalle cada una de estas fuerzas.

Fuerza de excitación

La fuerza de excitación es la ejercida por el fluido sobre el dispositivo, cuando éste se mantiene sin movimiento en presencia de oleaje. Se compone de la fuerza de Froude-Krylov y de la fuerza de difracción. La fuerza de Froude-Krylov es la presión ejercida por la ola sobre el dispositivo, y también se le denomina fuerza de excitación de la ola incidente. La fuerza de difracción es la presión de la ola difractada sobre el dispositivo, y es debida a un cambio de dirección (reflexión) de la ola entrante.

Dicho con otras palabras, la fuerza de excitación puede ser descompuesta en términos de oleaje incidente imperturbado (fuerza de Froude-Krylov) y la ola difractada (fuerza de difracción). La fuerza de excitación también es conocida como fuerza del oleaje o fuerza de difracción, siendo éste último término ambiguo. La siguiente ecuación integral permite obtener la fuerza de excitación:

$$f_e(t) = \int_0^{+\infty} k(t - \tau)\eta(\tau)d\tau \quad (3.2)$$

donde el término $k(t)$ es la transformada inversa de Fourier del vector de coeficientes de la fuerza de excitación [18]. Como se observa, solamente depende

de la altura del oleaje η , y no del movimiento del dispositivo ni del control que sobre él se aplique. Por tanto, el cálculo de la fuerza de excitación puede realizarse de manera desacoplada del comportamiento dinámico del WEC.

Fuerza de flotación

También conocida como fuerza de restauración, es la diferencia entre la fuerza hidrostática y el peso del cuerpo. El modelo asume que la fuerza de flotación es lineal, lo cual implica que el área en planta del cuerpo oscilante se considera constante. Se puede calcular mediante la expresión

$$f_s(t) = -cz(t) \quad (3.3)$$

donde c es el coeficiente de rigidez, que puede escribirse como $c = \rho g S + k_s$ siendo ρ la densidad del agua, g es la constante gravitacional, S la superficie que el cuerpo oscilante ocupa en planta y k_s la constante del resorte que ancla el dispositivo al fondo marino.

Fuerza de radiación

Puede que la mejor manera para describir la fuerza de radiación, sea en el dominio de la frecuencia, ya que permite una descripción física del fenómeno. La fuerza de radiación se define como el conjunto de fuerzas aplicadas entre el fluido y la boya, cuando éste oscila en aguas en calma.

El cuerpo oscilante y el agua que le rodea, se aplican mutuamente la fuerza de radiación debido a las olas que se originan durante la oscilación. Esta fuerza puede expresarse en función de la velocidad:

$$F_r(\omega) = -Z_r(\omega)U(\omega) \quad (3.4)$$

donde $U(\omega)$ es la transformada de Fourier de la velocidad del dispositivo oscilante. La función de transferencia entre la velocidad y la fuerza de radiación, $Z_r(\omega)$, es una función compleja dependiente de la frecuencia, denominada *impedancia de radiación*. Al descomponerse la impedancia de radiación en sus partes real e imaginaria, se tiene:

$$Z_r(\omega) = b(\omega) + j\omega m_{add}(\omega) \quad (3.5)$$

donde $m_{add}(\omega)$ se denomina *masa añadida*, y $b(\omega)$ se define como *el coeficiente o la resistencia de radiación*. Ambos parámetros son funciones reales que dependen de la geometría del dispositivo y de la frecuencia de la ola incidente.

La masa añadida $m_{add}(\omega)$ representa la masa de agua ubicada alrededor del flotador, que se acelera debido al movimiento de éste. El coeficiente de la radiación $b(\omega)$ está determinado por las olas que el cuerpo irradia debido a su movimiento oscilante.

Por tanto, la impedancia de radiación consta de dos términos. El primer término es proporcional a la velocidad, tratándose por consiguiente de una fuerza de amortiguamiento que realiza trabajo y transfiere energía fuera del sistema. El segundo término es proporcional a la aceleración. Esta fuerza actúa como inercia, almacenando energía en el sistema. Desarrollando, se tiene

$$F_r(\omega) = -U(\omega)[b(\omega) + j\omega m_{add}(\omega)] = -b(\omega)U(\omega) - j\omega m_{add}(\omega)U(\omega) \quad (3.6)$$

3.3.1. Modelo dinámico en el dominio de la frecuencia

Se puede aplicar la transformada de Fourier a la ecuación (3.1), obteniéndose:

$$F_e(\omega) + F_{pto}(\omega) - U(\omega)[b(\omega) + j\omega m_{add}(\omega)] - \frac{c}{j\omega}U(\omega) = m j\omega U(\omega) \quad (3.7)$$

La fuerza ejercida por el sistema de extracción de potencia puede expresarse empleando una función de transferencia denominada impedancia compleja $Z_{pto}(\omega)$ [41]:

$$F_{pto}(\omega) = -Z_{pto}(\omega)U(\omega) \quad (3.8)$$

La función de transferencia $Z_{pto}(\omega)$ determina el tipo de control que se ejercerá sobre el dispositivo. Es bien conocido que las condiciones óptimas de extracción de energía del oleaje dan lugar a una función de transferencia que se corresponde con un sistema no causal. Por ello, es necesario desarrollar estrategias de control, que si bien son subóptimas, tienen asociadas sistemas de control causales. Este es el caso de aquellas estrategias donde el tipo de control aplicado sobre el sistema de extracción de potencia es lineal. En estos casos la impedancia compleja Z_{pto} puede descomponerse en los siguientes términos:

$$Z_{pto}(\omega) = r_{pto} + j\left[\omega m_{pto} - \frac{k_{pto}}{\omega}\right] \quad (3.9)$$

Los valores de los parámetros m_{pto} , r_{pto} y k_{pto} dependen de la estrategia de control aplicado sobre el sistema de extracción de potencia que se elija. El efecto de amortiguamiento está relacionado con el parámetro r_{pto} , mientras que los parámetros m_{pto} y k_{pto} están relacionados con los efectos inercial y

elástico respectivamente.

Reorganizando (3.7), se tiene

$$F_e(\omega) + F_{pto}(\omega) = Z_i(\omega)U(\omega) \quad (3.10)$$

donde la impedancia intrínseca compleja se define mediante [18]:

$$Z_i(\omega) = b(\omega) + jx_i(\omega) \quad (3.11)$$

y la reactancia intrínseca es

$$x_i(\omega) = \omega[m + m_{add}(\omega)] - \frac{c}{\omega} \quad (3.12)$$

Sustituyendo la expresión (3.8) en la expresión (3.10), la fuerza de excitación y la velocidad del dispositivo oscilante están relacionadas del siguiente modo

$$F_e(\omega) = Z_{net}(\omega)U(\omega) \quad (3.13)$$

donde la impedancia neta del sistema oscilante es

$$Z_{net}(\omega) = Z_i(\omega) + Z_{pto}(\omega) \quad (3.14)$$

sustituyendo ahora las expresiones (3.4) y (3.8) en (3.7), se tiene

$$F_e(\omega) - Z_{pto}U(\omega) - Z_r(\omega)U(\omega) - \frac{c}{j\omega}U(\omega) = mj\omega U(\omega) \quad (3.15)$$

y operando se llega a

$$F_e(\omega) = j\omega[m + m_{add}(\omega)]U(\omega) + b(\omega)U(\omega) + \frac{c}{j\omega}U(\omega) + Z_{pto}U(\omega) \quad (3.16)$$

3.3.2. Modelo dinámico en el dominio del tiempo

A continuación, se describirá el modelo dinámico de un absorbedor puntual en el dominio del tiempo. Para ello, se partirá de la ecuación (3.7), donde operando se puede llegar a la siguiente expresión:

$$F_e(\omega) + F_{pto}(\omega) = Z(\omega)\{-\omega^2[m + m_{add}(\omega)] + j\omega b(\omega) + c\} \quad (3.17)$$

donde $Z(\omega)$ es la transformada de Fourier de la posición del cuerpo oscilante.

Normalmente, la resistencia de radiación $b(\omega)$ tiende a cero cuando la

frecuencia ω tiende a infinito. Esto no sucede con la masa añadida $m_{add}(\omega)$, que tiende a una constante m_∞ , denominada *masa añadida independiente de la frecuencia*. Por este motivo, la ecuación (3.17) no puede ser transformada al dominio del tiempo.

Si la reactancia debida a m_∞ se elimina de Z_r (ver ecuación (3.5)), la impedancia restante, sí será nula cuando la frecuencia tienda a infinito. Para conseguir esto, en la ecuación (3.17) se sumará y restará el término m_∞ a la masa añadida

$$F_e(\omega) + F_{pto}(\omega) = Z(\omega)\{-\omega^2[m + m_\infty + m_{add}(\omega) - m_\infty] + j\omega b(\omega) + c\} \quad (3.18)$$

La expresión anterior se puede agrupar del siguiente modo:

$$F_e(\omega) + F_{pto}(\omega) = Z(\omega)\{-\omega^2(m + m_\infty) - \omega^2[m_{add}(\omega) - m_\infty] + j\omega b(\omega) + c\} \quad (3.19)$$

reordenando, se tiene

$$F_e(\omega) + F_{pto}(\omega) = -\omega^2 Z(\omega)(m + m_\infty) + \omega j U(\omega)[m_{add}(\omega) - m_\infty] + U(\omega)b(\omega) + cZ(\omega) \quad (3.20)$$

Hay dos términos en (3.20), que implican multiplicar funciones en el dominio de la frecuencia: los términos $b(\omega)U(\omega)$ y $\omega j U(\omega)[m_{add}(\omega) - m_\infty]$. Una multiplicación de dos funciones en el dominio de la frecuencia, supone una convolución de las funciones correspondientes en el dominio del tiempo. Se suele combinar el término de amortiguamiento y el de masa añadida en un sólo término para simplificar el problema a una sola convolución.

$$F_e(\omega) + F_{pto}(\omega) = -\omega^2 Z(\omega)(m + m_\infty) + U(\omega)\{b(\omega) + j\omega[m_{add}(\omega) - m_\infty]\} + cZ(\omega) \quad (3.21)$$

Se puede ahora ejecutar la transformada inversa de Fourier del siguiente modo:

$$f_e(t) + f_{pto}(t) = (m + m_\infty)\ddot{z}(t) + \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \{b(\omega) + j\omega[m_{add}(\omega) - m_\infty]\} U(\omega) e^{j\omega t} d\omega + cz(t) \quad (3.22)$$

que también puede expresarse del siguiente modo:

$$f_e(t) + f_{pto}(t) = (m + m_\infty)\ddot{z}(t) + \int_{-\infty}^{+\infty} h_R(t - \tau) U(\tau) d\tau + cz(t) \quad (3.23)$$

donde h_R es la transformada inversa de Fourier de la impedancia de radiación reducida $H_R(\omega) = b(\omega) + j\omega[m_{add}(\omega) - m_\infty]$.

El primer término del segundo miembro de la ecuación (3.23) es

proporcional a la aceleración instantánea. El término $m_\infty \ddot{z}$, además de representar la fuerza del fluido, actúa exactamente como una masa añadida adicional que se incluye en el sistema. Tanto es así, que en un diagrama masa-resorte-amortiguador podría representarse mediante una masa adicional añadida al dispositivo.

El segundo término depende de los valores pasados de la velocidad, y por tanto, de la aceleración. Por tanto, está asociado con las olas radiadas en el pasado y en el presente. En la presente tesis, se resolverá esta integral mediante ecuaciones de estado [60].

3.4. Absorber olas significa generar olas

Al objeto de evaluar el impacto de la fuerza de radiación en la absorción de energía, este apartado pone de manifiesto la importancia y la necesidad de que exista este fenómeno. Un cuerpo que oscila en el agua produce olas. Un cuerpo grande y uno pequeño pueden producir olas del mismo tamaño, si el pequeño oscila con amplitudes mayores.

Generalmente, un buen absorbedor de olas es también un buen generador de olas. Por tanto, para absorber energía de las olas, es necesario desplazar agua de manera pulsante y en el instante adecuado (en la fase correcta), lo cual puede conseguirse con un cuerpo oscilante. También podemos conseguir desplazar agua de manera oscilante mediante una columna oscilante de agua (OWC) en una cámara fija que tiene una apertura al mar.

El hecho de absorber energía de las olas, significa que dicha energía debe ser “quitada” de la ola. Por tanto, debe haber una cancelación o reducción de olas, que puede ejecutarse mediante un dispositivo oscilante, ya que puede generar olas que se opongan (que estén en contrafase) a la marcha natural de la ola incidente.

En otras palabras, la ola generada por el WEC debe interferir destructivamente con otras olas. Esto explica la siguiente paradoja: “destruir una ola significa generar una ola”.

La figura 3.3, muestra un ejemplo donde se llega a absorber el 100 % del contenido energético de la ola. Se representa un cuerpo pequeño que oscila de manera óptima tanto vertical como rotacionalmente, en presencia de oleaje incidente.

Teóricamente, no se puede absorber más del 50 % de la energía de la ola, si sólo existe una ola radiada simétrica, o lo que es lo mismo, como muestra la

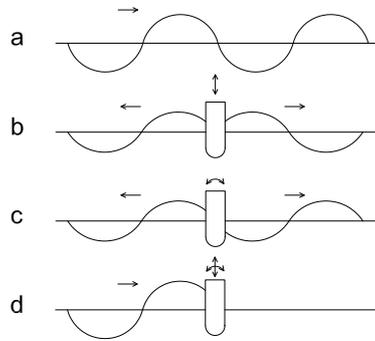


Figura 3.3: Absorción de oleaje mediante un WEC

curva b en la figura 3.3, si la ola es generada por un cuerpo oscilante simétrico que se desplaza únicamente en un sólo sentido, el vertical.

Igualmente, si sólo existe la ola radiada antisimétrica (curva c) del cuerpo simétrico, tampoco se puede absorber más del 50%.

Como se ha indicado, absorber olas significa generar olas. En la figura 3.3, la curva a representa una ola incidente no perturbada. La curva b y c ilustran la generación de una ola simétrica y antisimétrica respectivamente, si el cuerpo oscilase en aguas tranquilas. La curva d representa la superposición de las tres anteriores, y muestra la absorción completa de la energía de la ola regular incidente.

Capítulo 4

El Generador Lineal

4.1. Introducción

En este capítulo se desarrolla el modelo propio de un generador eléctrico lineal, caracterizado por utilizar, en vez de rotor (movimiento de rotación), un traslator (movimiento de traslación). Dicho modelo se ceñirá al caso del generador síncrono de imanes permanentes.

Las variables implicadas en el modelo de un generador lineal son analizadas e interpretadas. Asimismo, se describe la electrónica de potencia utilizada para conectar el generador a la red eléctrica.

4.2. Concepto de generador lineal

Los generadores lineales se han propuesto como dispositivos de extracción de potencia en el sector undimotriz [9], [61], [62], [63], [64].

4.2.1. Generador eléctrico

El método para capturar la energía de la ola, varía en función del convertidor, pero la conversión en energía eléctrica es muy parecida en todos ellos: utilizando generadores eléctricos.

A pesar de que no exista ninguna restricción respecto al generador eléctrico a utilizar en los sistemas de generación (de corriente continua o alterna), se

eligen casi exclusivamente máquinas de corriente alterna, por los siguientes motivos [65]:

- Relación potencia/peso mayor.
- La generación se produce a tensiones mayores.

4.2.2. Generador síncrono

El generador síncrono de imanes permanentes se utiliza ampliamente en los sistemas de generación. Sus ventajas son:

1. capacidad para producir el campo magnético sin tener pérdidas por efecto Joule.
2. elimina la necesidad de anillos rozantes.
3. elimina la necesidad de refrigeración del rotor.
4. disminuye el volumen necesario de la máquina.
5. disminuye el paso polar, lo que conlleva mayor número de polos y menor velocidad del generador, eliminando por tanto la necesidad de multiplicador de velocidad.

Si se conecta un generador síncrono directamente a red, como la frecuencia de ésta es constante, también deberá serlo la velocidad de giro. Por tanto, el sistema de transmisión mecánica, y especialmente el eje, debe soportar y absorber grandes esfuerzos originados por las fluctuaciones de la potencia generada.

Por ello, no se usan generadores síncronos directamente conectados a red. Sin embargo, sí se pueden utilizar si la conexión se realiza mediante un convertidor de frecuencia, cuya misión consiste en independizar la frecuencia del generador de la de la red, permitiendo de este modo el funcionamiento a velocidad variable.

4.2.3. Implantación del generador lineal en WECs

Para producir energía eléctrica, generalmente se utilizan generadores eléctricos rotativos como el generador síncrono. Los WECs se mueven a una velocidad pico típica de unos 2 m/s. Para convertir esta reducida velocidad, en la alta velocidad requerida por los generadores rotativos convencionales,

se utilizan mecanismos de conversión de potencia hidráulicos o neumáticos que aumentan el número de etapas, lo cual incrementa tanto los costes de inversión como las necesidades de mantenimiento del dispositivo, lo cual es totalmente desaconsejable en ambientes marinos. Además, la fiabilidad del dispositivo disminuye porque, al ser un sistema complejo, la probabilidad de fallos como el de sellado aumenta. Este defecto implicaría entrada de agua al dispositivo y/o derrame de aceite al mar.

La utilización de generadores eléctricos lineales evita la necesidad de convertir el movimiento lento del dispositivo en otro más rápido, evitándose así la necesidad de incorporar interfases mecánicas que originen complejos sistemas hidráulicos o neumáticos. Por tanto, el sistema de extracción de potencia es más simple y conlleva menores pérdidas de conversión y rozamiento, lo que implica un aumento de la eficiencia del dispositivo.

4.3. Generadores lineales. Tipos y descripción constructiva

Un generador lineal es un convertidor de energía electromecánico impulsado mediante un dispositivo principal sometido a un movimiento de vaivén, que convierte la potencia mecánica en potencia eléctrica [66].

4.3.1. Tipos de generadores lineales

La mayor parte de la investigación correspondiente al accionamiento directo de generadores, se ha centrado en las máquinas de reluctancia variable de imanes permanentes (Variable Reluctance Permanent Magnet, VRPM), también conocidas como máquinas de flujo transversal de imanes permanentes (TFM, Transverse Flux Machine) [67].

Se ha demostrado que las máquinas VRPM adolecen de un factor de potencia bajo [68]. A pesar de ello, estas máquinas ofrecen las mejores expectativas en cuanto a tamaño físico, masa y eficiencia. Sin embargo, hace falta realizar una compensación de reactiva para contrarrestar la alta inductancia inherente a estas máquinas, pudiendo utilizarse batería de condensadores [9].

La máquina híbrida de Vernier (VHM) es un tipo de máquina VRPM. Es fácil de construir y ofrece una solución compacta de accionamiento directo para aplicaciones de alto par y baja velocidad, pero su factor de potencia es bajo [69].

Por su parte, la construcción del estator del generador síncrono lineal trifásico de imanes permanentes de flujo longitudinal (LFPM) es simple y robusta.

4.3.2. Topología del generador lineal de imanes permanentes

Un aspecto importante para conseguir la supervivencia es la complejidad y longevidad de la tecnología. Cuanto más complejo es un sistema y más partes en movimiento contiene, más probable es que alguna de sus partes falle. Además, para aumentar las posibilidades de que sea comercialmente interesante, la necesidad de mantenimiento debería ser mínima. Para que esto sea así, el convertidor de energía de la ola puede utilizar un generador lineal síncrono de imanes permanentes, trifásico y de accionamiento directo, lo que evitaría la necesidad de engranajes, que requieren mantenimiento regular y cuyo riesgo de fallo es relativamente alto.

Los generadores pueden ser de flujo transversal (TFM) o longitudinal (LFPM). A su vez, los de flujo transversal pueden disponer los imanes montados en la superficie o enterrados [9].

4.3.3. Generador lineal del proyecto de Lysekil

Los principales parámetros del modelo de generador lineal implementado para esta tesis, corresponden al proyecto de Lysekil [67] y se presentan en la tabla 4.1.

Cuadro 4.1: Características del generador lineal

Características eléctricas		Características mecánicas	
Inductancia síncrona	7.8 mH	Velocidad nominal	0.7 m/s
Resistencia de los arrollamientos del estator	0.45 ohms	Dimensiones del núcleo magnético	40 x 6.5 x 400 mm
Corriente de la armadura <i>rms</i>	28.9 A	Longitud del estator	1300 mm
Potencia nominal	10 kW	Ancho del estator	400 mm
Eficiencia eléctrica	86 %	Longitud del pistón	1800 mm
Tensión fase-fase <i>rms</i>	200 V	Ancho del pistón	400 mm
Frecuencia fundamental	7.0 Hz	Ancho de polo	50 mm
Pérdidas por efecto Joule	1.0 kW	Peso del acero del estator	766 Kg

4.4 Modelo del generador síncrono lineal de imanes permanentes

El generador está formado por cables aislados, imanes permanentes Nd-Fe-B (Neodimio-Hierro-Boro), acero estructural y resortes. Los resortes están unidos a la parte baja del traslator y sirven para aplicar una fuerza de retracción después de que la boya y el traslator se hayan elevado debido a las crestas de las olas [58].

4.4. Modelo del generador síncrono lineal de imanes permanentes

Se realiza un cambio de variable desde el sistema de referencia abc al sistema de referencia dq para modelar el comportamiento del generador lineal. Este cambio conlleva una transformación de las variables trifásicas de los elementos del circuito estacionario a un sistema de referencia arbitrario [70].

$$f_{dq}(t) = Df_{abc}(t) \quad (4.1)$$

$$\begin{bmatrix} f_q(t) \\ f_d(t) \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta_m) & \cos(\theta_m - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_m + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\theta_m) & \sin(\theta_m - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta_m + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_a(t) \\ f_b(t) \\ f_c(t) \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

donde θ_m es un ángulo de referencia definido como la posición angular eléctrica de la tensión inducida en el estator. Por tanto, la velocidad angular eléctrica del sistema trifásico, o velocidad angular de las variables del estator es:

$$\omega_m(t) = \frac{d\theta_m(t)}{dt} \quad (4.3)$$

teniendo en cuenta que $\dot{z}(t)$ es la velocidad lineal del cuerpo oscilante, se puede llegar a la siguiente expresión equivalente [71]:

$$\dot{z}(t) = r\omega_{mec}(t) \longrightarrow \omega_{mec}(t) = \frac{\dot{z}(t)}{r} \quad (4.4)$$

$$l = 2 \cdot \pi \cdot r \rightarrow r = \frac{l}{2 \cdot \pi} \quad (4.5)$$

$$\omega_m(t) = p \cdot \omega_{mec}(t) = p \cdot \left(\frac{\dot{z}(t)}{r} \right) = \frac{p\dot{z}(t)}{\frac{l}{2\pi}} = \frac{\pi\dot{z}(t)}{\frac{l}{2p}} = \frac{\pi\dot{z}(t)}{\tau_p} \quad (4.6)$$

siendo $\omega_{mec}(t)$ la velocidad de giro angular, p el número de polos, r el radio del cuerpo oscilante y τ_p el paso polar, que se define como la relación entre

la longitud de la máquina y su número de polos. Definiendo λ como el ancho polar del generador lineal, se tiene:

$$\lambda = 2\tau_p \rightarrow \omega_m(t) = \frac{\pi \dot{z}(t)}{\tau_p} = \frac{2\pi \dot{z}(t)}{2\tau_p} = \frac{2\pi \dot{z}(t)}{\lambda} \quad (4.7)$$

Relación entre la fuerza ejercida por el sistema de extracción de potencia y la corriente estatórica en cuadratura

Un sistema trifásico equilibrado se define como un conjunto de cantidades sinusoidales de la misma amplitud, desplazadas 120° entre ellas [70]:

$$f_a(t) = \sqrt{2}f_s(t)\cos\theta_m(t) \quad (4.8)$$

$$f_b(t) = \sqrt{2}f_s(t)\cos[\theta_m(t) - \frac{2\pi}{3}] \quad (4.9)$$

$$f_c(t) = \sqrt{2}f_s(t)\cos[\theta_m(t) + \frac{2\pi}{3}] \quad (4.10)$$

donde $f_s(t)$ es una función que depende del tiempo. Aplicando (4.2), queda de la siguiente manera:

$$f_q(t) = \sqrt{2}f_s(t) \quad (4.11)$$

$$f_d(t) = 0 \quad (4.12)$$

Particularizando las expresiones (4.8, 4.9 y 4.10) para el caso de la fuerza electromotriz o tensión inducida en el arrollamiento estatórico v_{abc} , se tiene

$$v_a(t) = \omega_m(t)\psi\cos\theta_m(t) \quad (4.13)$$

$$v_b(t) = \omega_m(t)\psi\cos[\theta_m(t) - \frac{2\pi}{3}] \quad (4.14)$$

$$v_c(t) = \omega_m(t)\psi\cos[\theta_m(t) + \frac{2\pi}{3}] \quad (4.15)$$

donde ψ es el flujo concatenante del arrollamiento estatórico según el eje d . Aplicando (4.11, 4.12), estas tensiones pueden expresarse en los ejes de referencia dq del siguiente modo:

$$v_q(t) = \omega_m(t)\psi \quad (4.16)$$

$$v_d(t) = 0 \quad (4.17)$$

4.4 Modelo del generador síncrono lineal de imanes permanentes

La potencia instantánea de una máquina eléctrica trifásica puede expresarse en los ejes de referencia abc y dq del siguiente modo [70]:

$$p_{abc}(t) = v_a(t)i_a(t) + v_b(t)i_b(t) + v_c(t)i_c(t) \quad (4.18)$$

$$p_{dq}(t) = \frac{3}{2}[v_q(t)i_q(t) + v_d(t)i_d(t)] \quad (4.19)$$

donde i_q, i_d, v_q, v_d son las corrientes estatóricas y las tensiones inducidas respectivamente, en el sistema de referencia dq , mientras que $i_a, i_b, i_c, v_a, v_b, v_c$ corresponden al sistema de referencia abc .

Para el caso de una máquina lineal, y tomando como referencia las tensiones inducidas en el estator descritas en las ecuaciones (4.16, 4.17), la potencia instantánea entregada al sistema de extracción de potencia es:

$$p_{pto}(t) = \frac{3}{2}\omega_m(t)\psi i_q(t) \quad (4.20)$$

La ecuación (4.20) expresa la potencia eléctrica que entrega el generador eléctrico a la carga más la que se consume en pérdidas estatóricas. Por tanto, sustituyendo (4.6) en (4.20), la potencia mecánica a la entrada del generador puede expresarse del siguiente modo [72]:

$$p_{pto}(t) = \frac{3}{2} \frac{\pi \dot{z}(t)}{\tau_p} \psi i_q(t) \quad (4.21)$$

Considerando que la potencia producida es negativa cuando la fuerza del generador y la velocidad tienen el mismo signo, la potencia absorbida por el sistema de extracción de potencia puede ser calculado mediante la expresión:

$$p_{pto}(t) = -f_{pto}(t)\dot{z}(t) \quad (4.22)$$

y sustituyendo (4.21) en (4.22), se tiene

$$f_{pto}(t) = -\frac{p_{pto}(t)}{\dot{z}(t)} = -\frac{3\pi\psi i_q(t)}{2\tau_p} \quad (4.23)$$

$$f_{pto}(t) = -\frac{3\pi\psi}{2\tau_p} i_q(t) \quad (4.24)$$

Nótese que los parámetros τ_p y ψ sólo dependen de las características del generador. Por tanto, la fuerza ejercida por el sistema de extracción de potencia puede ser directamente controlada por medio de $i_q(t)$.

Ecuaciones de las tensiones estáticas en el generador lineal

Aplicando la transformación de Park, los flujos en los arrollamientos estáticos pueden expresarse en función de la corriente mediante la siguiente expresión [72]:

$$\lambda_d(t) = L_s i_d(t) + \psi \quad (4.25)$$

$$\lambda_q(t) = L_s i_q(t) \quad (4.26)$$

Las ecuaciones que definen las tensiones en el arrollamiento estático, son las siguientes [72]:

$$v_d(t) = R_s i_d(t) + \frac{d\lambda_d(t)}{dt} - \omega_m(t) \lambda_q(t) \quad (4.27)$$

$$v_q(t) = R_s i_q(t) + \frac{d\lambda_q(t)}{dt} + \omega_m(t) \lambda_d(t) \quad (4.28)$$

donde R_s es la resistencia del estator para cada una de las fases de la máquina trifásica. Sustituyendo las expresiones (4.25) y (4.26) en (4.27) y (4.28), se obtienen las siguientes expresiones:

$$v_d(t) = R_s i_d(t) + L_s \frac{d}{dt} i_d(t) - L_s \omega_m(t) i_q(t) \quad (4.29)$$

$$v_q(t) = R_s i_q(t) + L_s \frac{d}{dt} i_q(t) + L_s \omega_m(t) i_d(t) + \omega_m(t) \psi \quad (4.30)$$

4.5. Convertidores de potencia

La potencia eléctrica a la salida del generador lineal es pulsante. La figura 4.1 muestra la tensión de salida del generador lineal de imanes permanentes en oleaje regular. Como se puede observar, la forma de onda varía tanto en amplitud como en frecuencia. Esta situación es aún más acusada en oleaje irregular, es decir, las fluctuaciones del periodo y la amplitud son aún mayores. Por ello, se hace indispensable la aplicación de la electrónica de potencia para mantener la potencia inyectada a red y la tensión en niveles ajustados a los requerimientos de la red.

Uno de los primeros trabajos fue desarrollado por Mueller [9], quien comprobó que la aplicación de un control eléctrico directo es una buena opción para sistemas con accionamiento directo debido a su simplicidad. Mueller propuso conectar el generador a un enlace de continua mediante un rectificador, y del enlace de continua a la red mediante un convertidor

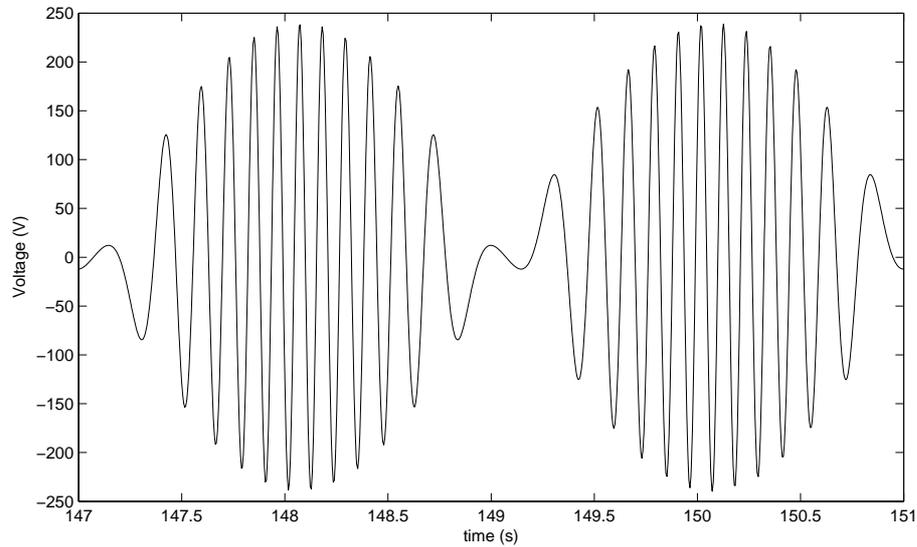


Figura 4.1: Tensión de salida monofásica de un generador lineal

DC/AC. Mueller también plasmó su preocupación de que los requisitos de potencia reactiva aumentarían considerablemente el tamaño del inversor. Indicó también que un absorbedor puntual captura su máxima potencia en su frecuencia de resonancia, y que dicha potencia disminuye dramáticamente cuando la frecuencia de las olas incidentes se alejan de la frecuencia de resonancia de la boya. Como solución, señaló que la aplicación de un sistema de control generaría una fuerza de control proporcional a la aceleración y al desplazamiento del WEC.

Posteriormente, Wu [71, 73] también propuso conectar el WEC a la red utilizando conjuntamente generadores eléctricos y convertidores de potencia VSCs (Voltage sources converters) en configuración “back to back”, y entró en el detalle del control, señalando que el controlador del convertidor del lado del generador se encargaría de:

- extraer la máxima potencia del oleaje
- minimizar las pérdidas en el generador

mientras que el convertidor del lado de la red se encargaría de:

- inyectar potencia activa constante a la red eléctrica.

- mantener constante la tensión de salida.

Existen otros investigadores, como Tedeschi y Molinas [45] que investigan cómo la electrónica de potencia hace posible implementar estrategias de control.

Debe tenerse en cuenta que la manera más habitual de controlar un absorbedor puntual, es actuando sobre la fuerza que el sistema de extracción ejerce sobre el dispositivo oscilante. Esta fuerza de control f_{pto} , puede definirse del siguiente modo:

$$f_{pto}(t) = m_{pto}\ddot{z}(t) + r_{pto}\dot{z}(t) + k_{pto}z(t) \quad (4.31)$$

Como se verá en capítulos posteriores, los parámetros m_{pto} , r_{pto} y k_{pto} dependen de la estrategia de control elegida. El efecto de amortiguamiento está relacionado con r_{pto} , mientras que los parámetros m_{pto} y k_{pto} están relacionados con los efectos inercial y elástico respectivamente.

La electrónica de potencia permite implementar los valores adecuados para los parámetros m_{pto} , r_{pto} y k_{pto} . Dichos valores dependerán de la estrategia de control elegida.

4.5.1. Topologías de interfase con la red eléctrica en centrales undimotrices

Esta sección trata acerca de las configuraciones típicas para conectar el sistema de extracción de potencia de una central undimotriz con la red eléctrica. La figura 4.2 muestra la configuración esquemática de una central undimotriz y la interfase para acondicionar la energía antes de ser inyectada a red [74].

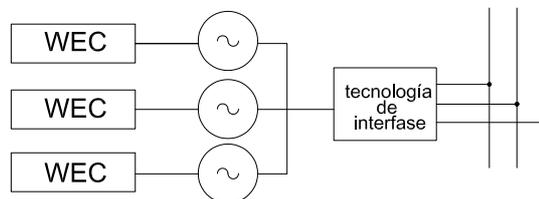


Figura 4.2: Representación esquemática del sistema de interconexión de un WEC

Las tecnologías de interfase más habituales son:

Generador de inducción con un STATCOM conectado en paralelo

El STATCOM, como muestra la figura 4.3, es un dispositivo de electrónica de potencia que permite solventar diversos problemas relativos a la calidad de la potencia eléctrica. Puede inyectar y absorber potencia reactiva en el punto de conexión con la red, de manera que se aminoren las fluctuaciones de tensión originadas por generación intermitente, como la producida en plantas eólicas y undimotrices.

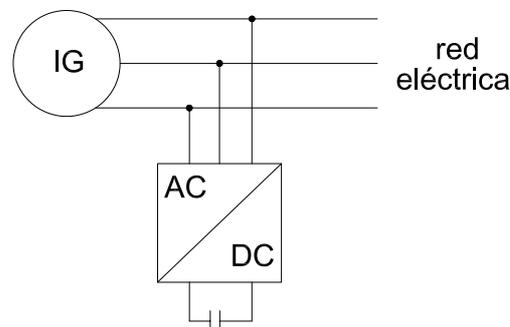


Figura 4.3: Generador de inducción con un STATCOM conectado en paralelo como tecnología de interfase

Si el enlace de continua del STATCOM se equipa con un dispositivo de almacenamiento de energía, el STATCOM también se puede utilizar para compensar las fluctuaciones de potencia activa por la naturaleza oscilante del oleaje.

Utilizando un STATCOM en la interfase, no se puede controlar la fuerza del generador directamente. Por tanto, esta topología podría utilizarse en un sistema de extracción de potencia hidráulico que posea algún sistema de almacenamiento de energía, como un acumulador de alta presión.

Generador de inducción con convertidores back-to-back en serie

La figura 4.4 muestra la configuración esquemática de un convertidor back-to-back utilizado como interfase con la red eléctrica. Esta tecnología consiste en dos convertidores de fuente de tensión acoplados mediante un enlace de continua. El convertidor back-to-back se conecta en serie entre el generador y la red. Cada convertidor tiene diferentes propósitos: el convertidor del lado del generador se utiliza para suministrar la corriente magnetizante requerida para excitar el generador de inducción y para controlar el par electromagnético.

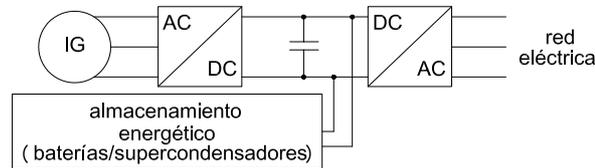


Figura 4.4: Generador de inducción con un convertidor back-to-back en serie como tecnología de interfase

El convertidor del lado de la red permite estabilizar la tensión, el factor de potencia y el flujo de potencia. Esta interfase permite que el generador trabaje a velocidad variable, lo cual puede ser beneficioso cuando tengan lugar huecos de tensión en la red para reducir el desequilibrio de potencia y por tanto aumentar la capacidad de sobrellevar la falta. Si el enlace de continua dispone de almacenamiento energético, puede utilizarse para controlar el flujo de potencia cuando tengan lugar grandes fluctuaciones de la potencia aportada por el oleaje.

La principal ventaja de esta topología es la posibilidad de suministrar control activo del par electromagnético. Por tanto, se pueden implementar sofisticados algoritmos de control. El tamaño del convertidor dependerá de la estrategia de control elegida.

Si el sistema de extracción de potencia es un generador lineal, esta interfase puede suministrar tanto el control de fase como el de amplitud mediante el control directo de las corrientes estáticas, y así controlar la fuerza que el sistema de extracción aplica sobre el dispositivo.

Generador de inducción doblemente alimentado con convertidor de rotor

Esta tecnología de interfase consiste en un convertidor back-to-back conectado en paralelo con el lado de la red, y en serie con los arrollamientos del rotor del generador, como muestra la figura 4.5. La ventaja que presenta esta tecnología frente a los convertidores back-to-back en serie, es que el tamaño de los convertidores es menor si el sistema se diseña de manera que las fluctuaciones de la velocidad del generador sean mínimas. Por tanto, esta tecnología no es adecuada para el accionamiento directo. Esta tecnología tiene menor capacidad para el control activo que la solución del convertidor back-to-back. Si aumenta el tamaño del convertidor, se puede aumentar el

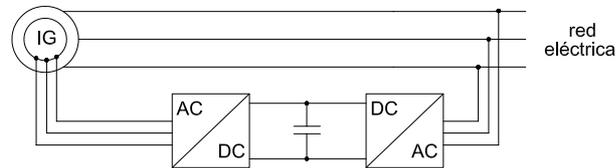


Figura 4.5: Generador de inducción doblemente alimentado con convertidor de rotor como tecnología de interfase

rango de velocidades del convertidor, pero el coste de la solución aumenta, resultando más atractiva la solución de un convertidor back-to-back en serie con flexibilidad total en el control.

Generador síncrono con convertidores back-to-back en serie

La figura 4.6 muestra la configuración esquemática de un generador síncrono asociado a un convertidor back-to-back utilizado como interfase con la red eléctrica. En este caso, se trata de un generador síncrono que puede girar a

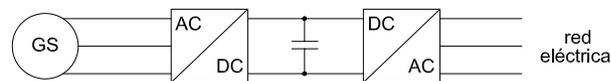


Figura 4.6: Generador síncrono con un convertidor back-to-back en serie como tecnología de interfase

cualquier velocidad, ya que la velocidad de giro del generador está desacoplada de la frecuencia de la red. Esta configuración será la utilizada en la presente tesis.

4.5.2. Descripción del convertidor back-to-back

Una configuración back-to-back del convertidor electrónico de potencia consiste en un puente rectificador/inversor basado en dispositivos IGBT controlados por una técnica de modulación de ancho de pulso (PWM), que permite dos grados de libertad eléctricos en cada uno de ellos.

El convertidor back-to-back está formado por dos convertidores de fuente de tensión (VSC) y un condensador. Uno de ellos está conectado al estator del

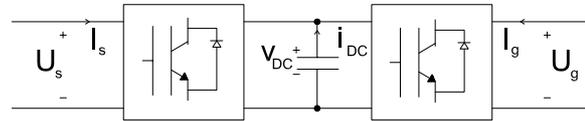


Figura 4.7: Configuración de un convertidor back-to-back

PMLG, y se le denomina convertidor del lado del generador, pues convierte la potencia alterna que aporta el WEC en potencia continua, y la almacena en el condensador.

El VSC conectado a la red eléctrica, denominado convertidor del lado de la red, asegura mediante una técnica de control PWM, que la tensión en el punto de conexión a red y la potencia inyectada, son constantes en amplitud y frecuencia.

El condensador, enlace DC entre ambos convertidores, absorbe la diferencia de potencia activa instantánea entre ambos convertidores, y funciona como una fuente de tensión para ellos.

Cuando el sistema se somete a un control reactivo, es necesario que durante partes del ciclo de oscilación, se inyecte energía en el sistema de extracción de potencia. Este requerimiento de un flujo de potencia reversible conlleva importantes consecuencias a la hora de implementar prácticamente una estrategia de control reactivo. Una de ellas es que los dispositivos involucrados deben permitir el flujo de potencia bidireccional.

Si se hubiese utilizado un puente de diodos, tan sólo se habría podido implementar el amortiguamiento, y el flujo de potencia sería unidireccional, mientras que el convertidor back-to-back permite la bidireccionalidad.

Rectificador

El convertidor de potencia del lado del generador es responsable de reducir las pérdidas del cobre ($i_d = 0$) y de mantener la fuerza de reacción que ejerce el generador en los valores indicados por la estrategia de control ($i_q = i_q^{ref}$). Como se vio en el apartado (4.4), existe una relación lineal entre la componente en cuadratura de la corriente i_q y la fuerza ejercida por el sistema de extracción de potencia f_{pto} , por lo que controlando la primera, se regula la segunda.

Se pudo haber utilizado un rectificador no controlado, pero en ese caso se hubiese perdido la bidireccionalidad del flujo de potencia que, como ya se ha mencionado, es un requisito indispensable para implementar el control reactivo.

Inversor

El convertidor back-to-back permite desacoplar el control del convertidor de potencia del lado del generador, del control correspondiente al convertidor del lado de la red. El convertidor de potencia del lado de la red debe mantener la tensión del enlace de continua y los parámetros eléctricos correspondientes al lado de la red, en valores adecuados.

Enlace de continua

Como se ha mencionado anteriormente, el convertidor del lado del generador controla la potencia absorbida por el generador, y lo consigue controlando i_q , que a su vez regula la fuerza aplicada por el generador f_{pto} . Por otro lado, el convertidor del lado de la red controla la potencia inyectada a la red. El condensador, denominado enlace de continua entre los dos convertidores, absorbe la diferencia de potencia activa instantánea entre ellos.

En esta tesis sólo se considerará el control del convertidor del lado del generador. Por ello, en la plataforma de simulaciones sólo se ha modelado hasta el enlace de continua. Dado que el convertidor del lado de la red controla la tensión en el enlace de continua, se asume control perfecto por lo que se sustituye por una fuente de tensión. La ecuación de la potencia activa de los convertidores back-to-back puede ser escrita del siguiente modo (ver figura 4.7),

$$0 = P_s + P_{DC} + P_g \quad (4.32)$$

donde P_s es la potencia activa que sale del generador, P_g es la potencia activa en el terminal de alterna del convertidor del lado de la red; y P_{DC} es la potencia activa del enlace de continua. Actualmente se investiga el uso de supercondensadores para aplicaciones unidimensionales, pero es necesario aumentar el ciclo de vida de los mismos para que puedan llegar a ser viables [75].

Modelo

El modelo empleado en la plataforma de simulación pretende valorar la eficiencia de las estrategias de control de WECs. Como se ha indicado anteriormente, el objetivo en esta tesis consiste en maximizar la potencia que el generador entrega al convertidor de potencia. Para ello, el modelo implementado en la plataforma de simulación incluye únicamente al convertidor del lado

del generador. El resto de los elementos se modelan mediante una fuente de tensión continua.

Se ha considerado el modelo promediado aplicado por Giroux [76]. Dicho modelo se basa en el principio de conservación de la energía, por lo que la potencia instantánea debe ser la misma en el lado de continua y en el lado de alterna del inversor [76].

$$v_{dc}i_{dc} = v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c \quad (4.33)$$

donde v_{dc} y i_{dc} son la tensión y la intensidad en el enlace de continua respectivamente. Se asume un comportamiento ideal del convertidor de potencia, por lo que no se consideran las pérdidas en el mismo. La expresión (4.33) representa la potencia que se pretende maximizar en el trabajo de esta tesis.

Capítulo 5

Control reactivo convencional

5.1. Introducción

En este capítulo se analiza la estrategia de control objeto de esta tesis, aplicada a los absorbedores puntuales: el control reactivo hidrodinámico. Se definirán inicialmente los conceptos de frecuencia natural y de resonancia. A continuación, se expondrán las condiciones que maximizan la energía capturada por el sistema de extracción de potencia: El conocido como *control óptimo*. También se analizarán las aproximaciones subóptimas más habituales del control óptimo: el control complejo-conjugado aproximado y el control pasivo. Además, se calculará la energía absorbida por el sistema de extracción de potencia.

5.2. Frecuencia natural y de resonancia

Es importante distinguir entre frecuencia natural y frecuencia de resonancia.

5.2.1. Definición de frecuencia natural

La frecuencia natural del sistema oscilante es aquella para la cual la impedancia intrínseca es real, y por tanto, su componente imaginaria se anula

[41]. Definida la impedancia intrínseca como (ver ecuación (3.11))

$$Z_i(\omega) = b(\omega) + jx_i(\omega) \quad (5.1)$$

la frecuencia natural del sistema es aquella para la cual se cumple que

$$x_i(\omega_n) = 0 \quad (5.2)$$

sustituyendo la expresión (3.12) en (5.2), se tiene

$$(\omega_n)[m + m_{add}(\omega_n)] - \frac{\rho g S + k_s}{\omega_n} = 0 \quad (5.3)$$

de donde es posible obtener

$$\omega_n = \sqrt{\frac{\rho g S + k_s}{m + m_{add}(\omega_n)}} \quad (5.4)$$

Obsérvese cómo en la ecuación (5.4), la masa añadida depende de la frecuencia, lo que implica que:

- es necesario utilizar un método iterativo para obtener el valor de la frecuencia natural del sistema oscilante.
- la frecuencia natural depende de las características hidrodinámicas del cuerpo oscilante. Sin embargo, es interesante resaltar que la frecuencia natural del sistema oscilante no depende de los parámetros asociados al sistema de extracción de potencia.

5.2.2. Definición de frecuencia de resonancia

La frecuencia de resonancia del absorbedor puntual se define como aquella frecuencia para la cual la impedancia neta del absorbedor puntual es real, y por tanto su componente imaginaria se anula. La impedancia neta, teniendo

en cuenta (3.14), puede expresarse como

$$Z_{net}(\omega) = b(\omega) + jx_i(\omega) + r_{pto} + jx_{pto}(\omega) \quad (5.5)$$

donde x_{pto} es la parte imaginaria de la impedancia del sistema de extracción de potencia en (3.9). La frecuencia de resonancia del sistema es aquella para la cual se cumple que

$$x_i(\omega_0) + x_{pto}(\omega_0) = 0 \quad (5.6)$$

teniendo en cuenta las expresiones (3.12) y (3.9) en (5.6), se tiene

$$\omega_0[m + m_{add}(\omega_0)] - \frac{\rho g S + k_s}{\omega_0} + \omega_0[m_{pto} - \frac{k_{pto}}{\omega_0}] = 0 \quad (5.7)$$

de donde es posible obtener

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{\rho g S + k_s + k_{pto}}{m + m_{add}(\omega_0) + m_{pto}}} \quad (5.8)$$

En donde ω_0 es la frecuencia de resonancia. Nótese que la masa añadida depende de la frecuencia, por lo que la ecuación es implícita. Para una frecuencia dada, es posible determinar unos valores de k_{pto} y m_{pto} que permiten establecer la frecuencia de resonancia del WEC. Nótese cómo esta condición puede alcanzarse actuando sobre k_{pto} o m_{pto} , o bien sobre ambas variables.

5.3. Control reactivo convencional

El control reactivo permite controlar la amplitud y la fase de la ola radiada, consiguiéndose que el dispositivo oscilante interactúe adecuadamente con la ola incidente en cada frecuencia, y dando lugar a la máxima absorción de energía de la ola [77].

Teniendo en cuenta (4.22), la energía que se transfiere desde el sistema oscilante al sistema de extracción de potencia durante un intervalo de tiempo T viene

dada por [18]

$$E_{pto} = - \int_0^T f_{pto}(t)u(t)dt \quad (5.9)$$

donde $u(t)$ es la velocidad del sistema oscilante y T es mucho mayor que el periodo pico del espectro del oleaje.

Asumiendo que la velocidad del sistema oscilante es nula para $t < 0$ y $t > T$, los límites de integración en (5.9) pueden extender al infinito, y aplicando el teorema de Parseval, esta energía puede ser expresada en el dominio de la frecuencia mediante la siguiente expresión [54],[18]:

$$E_{pto} = -\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} F_{pto}(\omega)U^*(\omega) d\omega \quad (5.10)$$

Teniendo en cuenta (3.8) y (3.13)

$$E_{pto} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} Z_{pto}(\omega) \frac{|F_e(\omega)|^2}{|Z_{net}(\omega)|^2} d\omega \quad (5.11)$$

y considerando que la parte imaginaria de $Z_{pto}(\omega)$ es una función par [18]

$$E_{pto} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} r_{pto}(\omega) \frac{|F_e(\omega)|^2}{|Z_{net}(\omega)|^2} d\omega \quad (5.12)$$

Esta energía es máxima cuando la reactancia intrínseca se cancela, y la resistencia del sistema de extracción de potencia coincide con la resistencia intrínseca [18].

Por tanto, el control complejo-conjugado puede ser expresado mediante la siguiente condición:

$$Z_{pto}^{op}(\omega) = Z_i^*(\omega) \quad (5.13)$$

Es decir, la máxima transferencia de potencia tiene lugar cuando la impedancia del sistema de extracción de potencia es igual a la conjugada compleja de la impedancia intrínseca. Esta forma de expresar la condición óptima corresponde al *control reactivo* o *control complejo-conjugado*.

También se pueden utilizar las siguientes expresiones equivalentes, descomponiendo la impedancia del sistema de extracción de potencia en sus partes

real e imaginaria:

$$r_{pto}^{op}(\omega) = b(\omega) \quad (5.14)$$

$$x_{pto}^{op}(\omega) = -x_i(\omega) \quad (5.15)$$

Existe otra forma de expresar la condición óptima, denominada *control de amplitud y fase* [18]:

$$U(\omega) = \frac{F_e(\omega)}{2b(\omega)} \quad (5.16)$$

Teniendo en cuenta que la resistencia de radiación $b(\omega)$ es real, la ecuación (5.16) puede ser descompuesta en una condición de amplitud óptima, según la cual, si la amplitud no está restringida, la resistencia del sistema de extracción de potencia debe ser igual a la resistencia de radiación, a la frecuencia del oleaje incidente [11].

$$|U(\omega)| = \frac{|F_e(\omega)|}{2b(\omega)} \quad (5.17)$$

y en una condición de fase óptima, según la cual la velocidad del sistema oscilante debe estar en fase con la fuerza de excitación ejercida sobre él [11]. Esto sucede cuando la frecuencia del oleaje coincide con la frecuencia natural del dispositivo. Por tanto, cuando esto no suceda, se debe actuar sobre el cuerpo para que la condición se cumpla.

$$\angle U(\omega) = \angle F_e(\omega) \quad (5.18)$$

De esta manera, el sistema oscilante estará en resonancia con la fuerza de excitación de la ola, lo cual sólo puede acontecer en oleaje regular si se aplica control óptimo.

5.4. Control reactivo óptimo. Denominaciones

Como ya se ha mencionado, para incrementar los beneficios de un sistema de accionamiento directo, y con el fin de maximizar la extracción de energía, se puede aplicar la condición ideal para el control de un sistema de extracción de potencia lineal, también denominada:

- control reactivo

- control óptimo
- control complejo-conjugado
- ajuste de impedancia
- control de amplitud y fase

Todos estos términos se refieren a la condición ideal que se establece para una determinada frecuencia. Esta variedad de denominaciones se debe a los siguientes motivos:

La condición ideal u *óptima* establece que la impedancia del sistema de extracción de potencia debe ser igual a la conjugada compleja de la impedancia intrínseca para cualquier frecuencia [11]. Un caso particular del control óptimo es el oleaje regular, donde se particulariza para una sola frecuencia. Por tanto, se trata de un *ajuste de impedancia*, ya que es posible calcular una impedancia del sistema de extracción de potencia que coincida con la conjugada compleja de la impedancia intrínseca.

Con el fin de que las condiciones ideales sean aplicables, la impedancia del sistema de extracción de potencia debe ser compleja, y por tanto, debe contener términos reactivos. Esto conlleva que también se le conozca como *control reactivo*.

Las condiciones ideales se pueden dividir en dos:

- que la velocidad tenga una amplitud correcta.
- que la velocidad tenga una fase correcta.

De ahí que también se le conozca como *control de amplitud y fase*.

Para obtener el movimiento oscilatorio óptimo del sistema oscilante, que maximice la energía absorbida por el sistema de extracción de potencia, es necesario devolver parte de la energía al mar durante pequeñas fracciones temporales de cada ciclo de oscilación. Por tanto, la denominación de control reactivo hace referencia a la presencia de una potencia reactiva y a la necesidad de inyectar energía al sistema oscilante durante parte del ciclo.

Para poner esta estrategia en práctica, es necesario utilizar una máquina de conversión de energía reversible que tenga pocas pérdidas de conversión ya que, cuando el sistema de extracción de potencia no es ideal, la eficiencia global del sistema puede ser pobre si se considera la energía eléctrica producida.

La frecuencia a la que las olas del mar actúan sobre los cuerpos oscilantes puede variar enormemente, pero el ancho de captura del dispositivo es limitado. Esto se debe a que los absorbedores puntuales tienen un ancho de captura estrecho porque sus dimensiones físicas son pequeñas comparadas con la longitud de la ola incidente.

Por lo tanto, las características del dispositivo deben ajustarse al oleaje de manera que se pueda extraer la máxima energía de él. Esto implica que se ha de controlar el movimiento recíproco del dispositivo oscilante si se desea que trabaje adecuadamente en un amplio rango de condiciones. Los métodos de control pretenden obtener una fase y una amplitud de oscilación óptimas para maximizar la extracción energética.

5.5. Causalidad

El concepto de causalidad es crucial en el análisis de sistemas, y también se aplica para describir el control de WECs.

El término causal se utiliza para describir un sistema que no se ve afectado por valores del futuro estado del sistema. Por otro lado, un sistema acausal es aquél que depende del estado futuro del sistema. Un sistema anticausal es el que sólo depende de valores presentes y futuros del sistema.

Sea un WEC que se desplaza monocromáticamente a una sola frecuencia, ω_k , donde el subíndice s indica que el valor de la frecuencia ω se particulariza para la única frecuencia existente (oleaje regular). Si se aplica el ajuste de impedancia a dicha frecuencia, entonces el control es causal (no hace falta información del futuro) y el rendimiento es óptimo (se produce la absorción completa de la energía de la ola). Es decir, se pueden calcular las condiciones del control óptimo: el valor de la impedancia óptima del sistema de extracción de potencia será la conjugada compleja de la impedancia intrínseca a dicha frecuencia ω_k .

$$\check{Z}_{pto}(\omega_k) = Z^*(\omega_k) \quad (5.19)$$

En la expresión anterior, la tilde indica valor óptimo, en vez de valor general. Teniendo en cuenta la expresión (3.14), la impedancia neta (combinación de la correspondiente al sistema de extracción y a la intrínseca), será dos veces el coeficiente de amortiguamiento a la frecuencia dada ω_k ,

$$\check{Z}_{net}(\omega_k) = Z_i(\omega_k) + \check{Z}_{pto}(\omega_k) = Z_i(\omega_k) + Z_i^*(\omega_k) = 2B(\omega_k) \quad (5.20)$$

Si se considera que la impedancia del sistema de extracción de potencia puede descomponerse en términos de masa, amortiguamiento y resorte (ver ecuación (3.9)), $Z_{pto}(\omega_k) = j\omega_k m_{pto} + b_{pto} + c_{pto}/j\omega_k$, los siguientes valores de los coeficientes permitirán el cumplimiento de la condición ideal a la frecuencia ω_k :

$$\check{m}_{pto}(\omega_k) = -[m + m_{add}(\omega_k)] \quad (5.21)$$

$$\check{b}_{pto}(\omega_k) = B(\omega_k) \quad (5.22)$$

$$\check{c}_{pto}(\omega_k) = -c \quad (5.23)$$

Nótese que los coeficientes de la impedancia del sistema de extracción m_{pto} , b_{pto} y c_{pto} son constantes. Para definir la fuerza que debe aplicar el sistema de extracción de potencia en el dominio del tiempo $f_{pto}(t)$, es necesario realizar la transformada inversa de Fourier. Como el desplazamiento del dispositivo es sinusoidal (oleaje regular), dicha fuerza puede expresarse del siguiente modo,

$$\check{f}_{pto}(t) = -[m + m_{add}(\omega_k)]\check{z}(t) + B(\omega_k)\dot{z}(t) - cz(t) \quad (5.24)$$

Si ahora se considera oleaje irregular, la frecuencia ya no va a ser única, sino que existirá un espectro de frecuencias. Las condiciones ideales no se podrán cumplir para todas las frecuencias de dicho espectro, sino sólo para una (generalmente se elige la frecuencia pico del oleaje), incumpléndose para las demás frecuencias. Este incumplimiento provoca que el control sea sub-óptimo cuando el oleaje es irregular, en cuyo caso deben realizarse aproximaciones (la elección de una frecuencia) para asegurar la causalidad, que provocan que el rendimiento sea menor. A continuación, se describen dos estrategias de control causal subóptimo que han sido utilizadas en las simulaciones con fines comparativos.

5.5.1. Control pasivo (RLC)

El control pasivo, también denominado control de carga resistiva, no requiere intercambios de potencia reactiva entre el sistema de extracción de potencia y el sistema oscilante. Por tanto, la máquina eléctrica nunca tiene que trabajar como motor. Esta estrategia puede expresarse mediante la siguiente expresión:

$$F_{pto}(\omega) = -\check{r}_{pto} U(\omega) \quad (5.25)$$

en donde la resistencia del sistema de extracción de potencia para la frecuencia elegida ω_k es [50]

$$\check{r}_{pto} = \sqrt{b^2(\omega_k) + x_i^2(\omega_k)} \quad (5.26)$$

El valor \check{r}_{pto} dado por (5.26) optimiza la potencia capturada por el sistema de extracción de potencia aplicando una estrategia de control pasivo en oleaje regular.

Las figuras 5.1 y 5.2 muestran los resultados obtenidos cuando las estrategias de control causal que se describen en esta sección, se aplican a una esfera semisumergida de radio 2.5 m, considerando un periodo de oleaje regular de 4 s y una altura de ola de 1 m. Se muestran series temporales de la fuerza de excitación normalizada, la posición del dispositivo oscilante y su velocidad.

La figura 5.1 muestra el comportamiento del control pasivo. Nótese que la fuerza de excitación y la velocidad no están en fase.

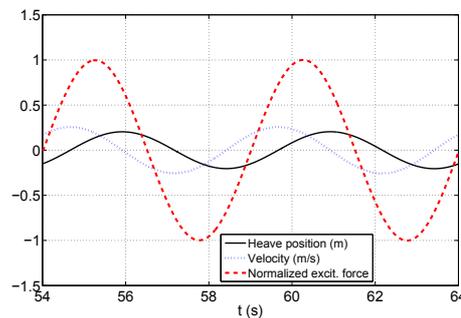


Figura 5.1: Ejemplo de serie temporal cuando se aplica una estrategia de control RLC

5.5.2. Control complejo-conjugado aproximado (ACC)

Como se ha indicado anteriormente, la condición óptima que maximiza la energía captada del oleaje viene dada por cualquiera de las dos siguientes ecuaciones (5.13) y (5.16).

Para que se pudiese implementar el control reactivo (5.13), sería necesario realizar una retroalimentación directa de la velocidad del cuerpo oscilante. Ello supone un obstáculo, ya que la impedancia intrínseca Z_i , llega a ser no causal debido a la conjugada compleja. En otras palabras, la fuerza óptima aplicada por el sistema de extracción de potencia al cuerpo oscilante, depende de valores futuros de la velocidad del cuerpo oscilante, lo cual obviamente es imposible de implementar en la práctica, ya que la velocidad depende a su vez de la fuerza ejercida por el sistema de extracción de potencia.

Por otro lado, para que se pudiese implementar el control de amplitud y fase (5.16), se tendría que multiplicar la fuerza de excitación por una función de transferencia, dando como resultado la velocidad óptima que sirve de consigna. A continuación, se podría programar un controlador para asegurar que el cuerpo oscilante se ajusta a la velocidad deseada en cada momento. Por desgracia, esta alternativa también se ve afectada del problema de la causalidad, ya que la función de transferencia no es causal.

Esto puede resolverse de manera aproximada si:

- se pudiera predecir la fuerza de excitación futura, o
- aproximando la función de transferencia (5.16) mediante una función causal.

En cualquier caso, estamos obligados a buscar aproximaciones que permitan la implementación práctica del control reactivo. Son las denominadas *estrategias subóptimas*.

Perdigão et al. propuso una solución para aproximar el control complejo conjugado aplicado a un dispositivo basado en columna oscilante de agua [78]. Para ello, aproximó la impedancia del sistema de extracción Z_{pto} mediante una función de transferencia racional.

La estrategia de control ACC se basa en un modelo lineal de segundo orden, que considera valores constantes para los coeficientes del sistema de extracción de potencia. Por tanto, la impedancia del sistema de extracción de potencia

puede expresarse como

$$\tilde{Z}_{pto}(\omega) = \tilde{r}_{pto} + j[\omega\tilde{m}_{pto} - \frac{\tilde{k}_{pto}}{\omega}] \quad (5.27)$$

donde \tilde{r}_{pto} , \tilde{m}_{pto} and \tilde{k}_{pto} son los coeficientes constantes del sistema de extracción de potencia asociados al control ACC, referentes al amortiguamiento, la masa y el resorte respectivamente.

El ajuste de impedancia expresado mediante las ecuaciones (5.14) y (5.15) se particulariza para una frecuencia adecuadamente elegida ω_k , que depende de las características del oleaje [41, 50], de manera que

$$\tilde{r}_{pto} = b(\omega_k) \quad (5.28)$$

y

$$\tilde{x}_{pto} = \omega_k\tilde{m}_{pto} - \frac{\tilde{k}_{pto}}{\omega_k} = -\omega_k[m + m_{add}(\omega_k)] + \frac{c}{\omega_k} \quad (5.29)$$

El valor asignado a ω_k suele ser el correspondiente a la frecuencia pico del espectro del oleaje [37].

La condición (5.29) implica un grado de libertad a la hora de asignar valores a los parámetros \tilde{m}_{pto} y \tilde{k}_{pto} .

Se analizan diversas estrategias de control en [41] dependiendo de los coeficientes considerados en la impedancia del sistema de extracción de potencia. La estrategia amortiguamiento-resorte ha sido la considerada en esta tesis, de manera que los valores de los coeficientes del sistema de extracción de potencia se adoptan como:

$$\tilde{m}_{pto} = 0 \quad (5.30)$$

$$\tilde{k}_{pto} = \omega_k^2[m + m_{add}(\omega_k)] - c \quad (5.31)$$

La figura 5.2 muestra el rendimiento de la estrategia ACC cuando el sistema se sintoniza a la frecuencia del oleaje. Nótese que la fuerza de excitación de la ola y la velocidad del dispositivo oscilante están en fase cuando se aplica esta estrategia de control, tal y como se describe en [18]. Además, la amplitud de las oscilaciones es mayor que en el caso anterior.

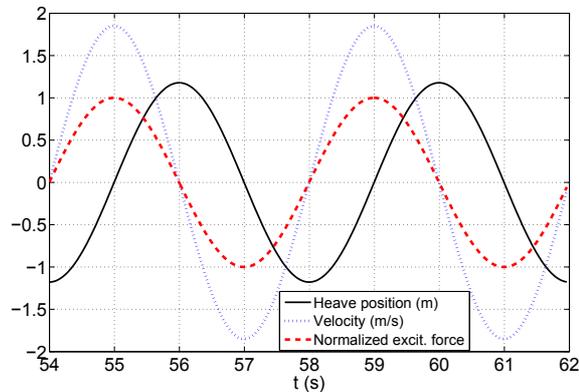


Figura 5.2: Ejemplo de serie temporal cuando se aplica una estrategia de control ACC

5.6. Resultados

Esta sección compara los resultados alcanzados por el control pasivo (RLC) y el control complejo-conjugado aproximado (ACC), cuando se aplican al mismo WEC. Los ejemplos presentados se basan en coeficientes hidrodinámicos tomados de la referencia [79]. Estos coeficientes corresponden a una boya esférica que oscila verticalmente, de radio 2.5 m, que presenta la mitad de su superficie sumergida en ausencia de movimiento y oleaje.

Se ha utilizado el programa WAMIT® para calcular los valores hidrodinámicos. La constante del resorte considerada es 6.2 kN/m. El modelo del generador lineal implementado corresponde al proyecto de Lysekil [67], que ha sido desarrollado por el centro sueco para la conversión de energía eléctrica renovable, ubicado en la universidad de Uppsala. Sus principales parámetros se presentan en la tabla 4.1.

Las alturas significantes consideradas son 1.4 m, 2.2 m y 3 m. Las fuerzas de excitación y radiación se han obtenido mediante aproximación, utilizando las funciones de transferencia de respuesta en frecuencia de la boya.

Para ejecutar las simulaciones en el dominio del tiempo en condiciones reales, se ha llevado a cabo un gran número de simulaciones numéricas en oleaje irregular, para diferentes valores del periodo pico, entre 2.5 y 8 s, repitiendo las mismas simulaciones para diferentes valores de la fase aleatoria, con el fin de obtener una estimación media para cada estrategia.

5.6.1. Potencia absorbida por el sistema de extracción de potencia

La figura 5.3 muestra la potencia media que puede ser absorbida por el sistema de extracción de potencia en el rango de periodos considerado, para cada una de las dos estrategias convencionales analizadas (RLC y ACC).

Nótese que la máxima extracción de potencia ocurre cuando se aplica el control ACC, porque el propósito de esta estrategia es maximizar la energía absorbida por el sistema de extracción de potencia.

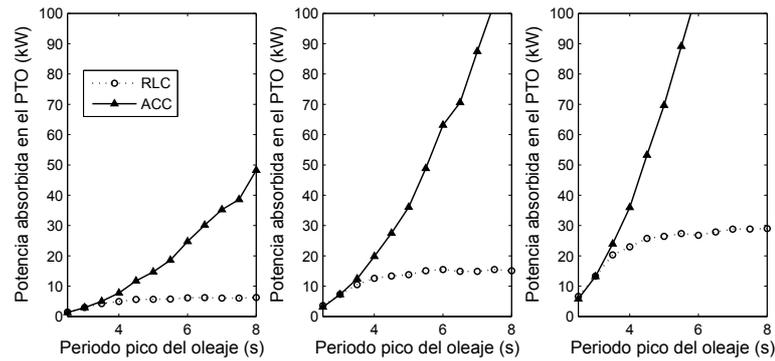


Figura 5.3: Potencia absorbida por el sistema de extracción de potencia para cada estrategia, con alturas significantes (a) $H=1.4$ m (b) $H=2.2$ m (c) $H=3$ m

Nótese el aumento significativo de la potencia capturada en el sistema de extracción de potencia a medida que aumenta el periodo pico del oleaje cuando se aplica una estrategia de control complejo-conjugado aproximado.

Capítulo 6

Consideración de las pérdidas en el generador lineal

6.1. Introducción

El análisis desarrollado en capítulos anteriores ha permitido definir un modelo hidrodinámico para los sistemas oscilantes y establecer las bases del control del movimiento de dicho sistema, que en adelante se denominará *control reactivo convencional*. En este capítulo se presenta el procedimiento que permite cuantificar la energía transferida al convertidor back-to-back.

Para ello, primeramente se deben considerar las pérdidas que se producen en el generador lineal. A continuación, se analizan en detalle dichas pérdidas y se establece la ecuación que cuantifica la transferencia de energía hacia el convertidor correspondiente al lado del generador, denominado convertidor del lado del generador. Finalmente, se analiza el comportamiento de un WEC sometido a dos controles subóptimos habituales (ACC y RLC) y se muestra la potencia que es capaz de enviar al convertidor de potencia, el ratio potencia pico-potencia media, y su dinámica de movimiento.

6.2. Procedimiento

Como se ha indicado anteriormente, el control reactivo puede implementarse utilizando conjuntamente generadores lineales de accionamiento directo y

convertidores electrónicos de potencia. Estos equipos intercambian energía con el sistema oscilante a través del generador lineal. Ahora se pretende calcular la energía enviada al convertidor back-to-back en función de los parámetros de control del sistema de extracción de potencia. Para ello, se utilizará inicialmente la relación existente entre i_q y f_{pto} (ver ecuación (4.24)) para expresar las pérdidas en el cobre del generador. De esta forma, se podrá incluir en la formulación del modelo una relación lineal entre la dinámica del sistema oscilante y la intensidad de salida del generador. Posteriormente, se formulará la energía transferida al convertidor de potencia.

6.3. Energía transferida al convertidor primario

La energía transferida desde el generador lineal al convertidor de potencia E_c puede expresarse como un balance entre la energía extraída por el sistema de extracción de potencia y las pérdidas en el cobre del generador lineal.

$$E_c = E_{pto} - E_{loss} \quad (6.1)$$

Considerando (5.9), la energía capturada por el sistema de extracción de potencia puede calcularse del siguiente modo

$$E_{pto} = - \int_0^T f_{pto}(t)u(t) dt \quad (6.2)$$

Las pérdidas en el cobre del generador lineal pueden ser expresadas de la siguiente manera [80]

$$E_{loss} = \int_{-\infty}^{+\infty} R_s [i_a^2(t) + i_b^2(t) + i_c^2(t)] dt \quad (6.3)$$

por tanto, la ecuación (6.1) puede expresarse del siguiente modo

$$E_c = - \int_0^T f_{pto}(t)u(t) dt - \int_{-\infty}^{+\infty} R_s [i_a^2(t) + i_b^2(t) + i_c^2(t)] dt \quad (6.4)$$

La expresión anterior ya permite obtener la energía transferida al convertidor de potencia. Sin embargo, esta formulación no es idónea para el proceso de optimización que se realizará en el próximo capítulo debido a que las pérdidas del generador no están expresadas en parámetros hidrodinámicos. A continuación, se obtendrá una expresión de las pérdidas equivalente, expresada en función de las variables hidrodinámicas.

El primer término del segundo miembro de la ecuación, ya fue calculado en (5.12). Por su parte, las pérdidas pueden expresarse en función de las componentes de corriente en coordenadas $dq0$ [70] mediante,

$$E_{loss} = R_s \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{3}{2} [i_d^2(t) + i_q^2(t) + 2i_0^2(t)] dt \quad (6.5)$$

Como el PMLG es simétrico, las variables de secuencia cero son nulas [71].

$$i_0(t) = 0 \quad (6.6)$$

Además, la componente en el eje d de la corriente estatórica suele controlarse de manera que valga cero, con el fin de reducir las pérdidas de potencia en el estator del PMLG [71].

$$i_d(t) = 0 \quad (6.7)$$

Sustituyendo (6.6) y (6.7) en (6.5), se obtiene la siguiente expresión:

$$E_{loss} = \frac{3}{2} R_s \int_{-\infty}^{+\infty} i_q^2(t) dt \quad (6.8)$$

En este punto se puede introducir (4.24)

$$i_q(t) = -\frac{2\tau_p f_{pto}(t)}{3\pi\psi} \quad (6.9)$$

Capítulo 6 Consideración de las pérdidas en el generador lineal

Quedando entonces

$$E_{loss} = 3R_s \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\left(-\frac{2\tau_p f_{pto}(t)}{3\pi\psi}\right)^2}{2} dt = \frac{2R_s\tau_p^2}{3\pi^2\psi^2} \int_{-\infty}^{+\infty} f_{pto}^2(t) dt \quad (6.10)$$

$$E_{loss} = \delta \int_{-\infty}^{+\infty} f_{pto}^2(t) dt \quad (6.11)$$

donde la variable auxiliar δ es

$$\delta = \frac{2\tau_p^2}{3\pi^2\psi^2} R_s \quad (6.12)$$

Aplicando el teorema de Parseval en (6.11), se obtiene la siguiente expresión en el dominio de la frecuencia:

$$E_{loss} = \frac{\delta}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} |F_{pto}(\omega)|^2 d\omega \quad (6.13)$$

Considerando (3.8) y (3.13) en (6.13),

$$E_{loss} = \frac{\delta}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} |Z_{pto}(\omega)|^2 \frac{|F_e(\omega)|^2}{|Z_{net}(\omega)|^2} d\omega \quad (6.14)$$

De esta manera, la energía transferida puede expresarse mediante la siguiente expresión utilizando (5.12) y (6.14)

$$E_c = E_{pto} - E_{loss} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} |F_e(\omega)|^2 \frac{r_{pto}(\omega) - \delta |Z_{pto}(\omega)|^2}{|Z_{net}(\omega)|^2} d\omega \quad (6.15)$$

Esta expresión, que se optimizará en el siguiente capítulo, da como resultado la energía entregada al convertidor considerando la fuerza de excitación, las características hidrodinámicas del cuerpo oscilante, las principales características del generador lineal y los parámetros de control del sistema de extracción de potencia.

6.4. Resultados

En esta sección, la formulación referente al control reactivo desarrollada anteriormente se aplica a un sistema oscilante.

Se pondrá de manifiesto la diferencia entre la energía capturada por el sistema de extracción de potencia y la que se transfiere al primer convertidor. Dicha diferencia se debe a las pérdidas que tienen lugar en el generador lineal.

Los ejemplos presentados están basados en los coeficientes hidrodinámicos indicados en la referencia [79]. Estos coeficientes corresponden a una boya que oscila verticalmente, que se encuentra semisumergida cuando no hay movimiento ni oleaje. El modelo de generador lineal implementado corresponde al proyecto de Lysekil [67].

6.4.1. La potencia transferida al sistema de extracción de potencia y al convertidor electrónico

En este apartado se pretende comparar la energía capturada por el sistema de extracción de potencia y la que se transfiere al primer convertidor.

La energía transferida al sistema de extracción de potencia puede obtenerse mediante la expresión (5.12), mientras que la energía transferida al convertidor electrónico de potencia puede obtenerse de (6.4) o (6.15).

La figura 6.1 muestra la energía media extraída por el sistema oscilante y entregada al sistema de extracción de potencia en oleaje regular. También se muestra la potencia media transferida al convertidor electrónico de potencia.

Nótese que, en el rango de periodos mostrado, la potencia absorbida por el sistema de extracción de potencia aumenta con el periodo del oleaje, mientras que la potencia entregada al primer convertidor alcanza su punto máximo, y entonces disminuye cuando el periodo del oleaje aumenta. La diferencia se debe a la resistencia que ofrece el cobre de los arrollamientos del generador lineal.

En el caso dibujado, en $T=3.6$ s, no hay flujo de potencia medio a través del convertidor de potencia. Además, el sistema de extracción de potencia recibe 16 kW. Esto significa que la potencia absorbida por el sistema de extracción de potencia no se envía a la red si se aplica el control reactivo convencional. La estrategia de control reactivo puede ser altamente ineficiente, y podría ser mejorada.

Otra desventaja radica en que, para conseguir las condiciones de resonancia requeridas por el control reactivo, pueden darse situaciones extremas donde el

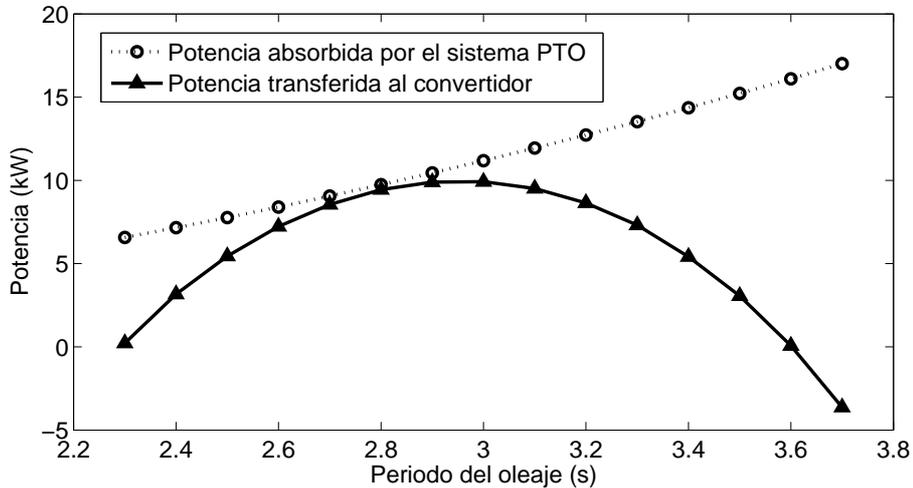


Figura 6.1: Potencia absorbida por el sistema de extracción de potencia y potencia transferida al convertidor primario

sistema oscilante y el sistema de extracción de potencia intercambien grandes cantidades de energía. Las pérdidas también aumentan a medida que estos intercambios son mayores.

Nótese que, en $T = 2.79$ s. (frecuencia natural), ambas potencias son similares. Esto significa que apenas hay intercambios de potencia a dicha frecuencia y el flujo energético va permanentemente desde el sistema oscilante al convertidor de potencia.

Las pérdidas de potencia pueden obtenerse de la ecuación (6.3) o (6.14). La figura 6.2 muestra las pérdidas asociadas al generador lineal.

Nótese que cuando las pérdidas en el generador lineal aumentan, la potencia transferida al convertidor disminuye y viceversa. Nótese que la potencia que se transfiere al convertidor electrónico puede ser nula, o incluso cambiar su signo si las pérdidas aumentan considerablemente ($T = 3.6$ s. en la figura 6.2).

6.4.2. Potencia transferida al convertidor primario en función de los parámetros de control

La figura 6.3 corresponde a la gráfica tridimensional de la potencia transferida al convertidor primario en oleaje regular, que hasta ahora no se

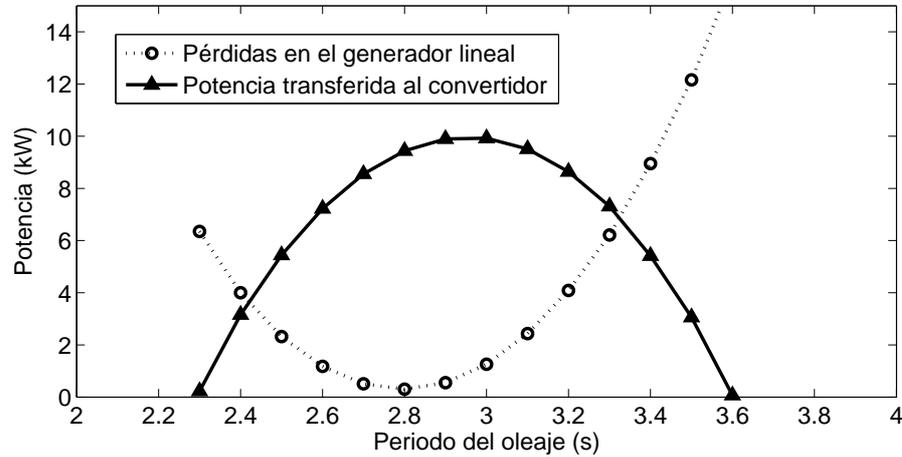


Figura 6.2: Pérdidas en el generador lineal

había considerado (ver ecuación 6.15). Dicha gráfica representa la potencia transferida al convertidor cuando se varían los parámetros de control r_{pto} y k_{pto} , asumiendo m_{pto} nulo. Dichos parámetros componen la impedancia del sistema de extracción de potencia, del siguiente modo:

$$Z_{pto}(\omega) = r_{pto} + j\left[\omega m_{pto} - \frac{k_{pto}}{\omega}\right] \quad (6.16)$$

A continuación, se indica el parámetro asociado a cada dirección del sistema de referencia:

- eje z , la potencia transferida al convertidor primario.
- eje x , el valor de x_{pto} , que a su vez combina los parámetros de control k_{pto} y m_{pto} .
- eje y , el parámetro de control r_{pto} .

Teniendo en cuenta que x_{pto} depende tanto de m_{pto} como de k_{pto} , se puede utilizar cualquiera de ellos o una combinación de ambos para calcular los valores del eje x . En esta tesis se ha adoptado el criterio $m_{pto} = 0$ y por tanto en la gráfica sólo se muestra k_{pto} .

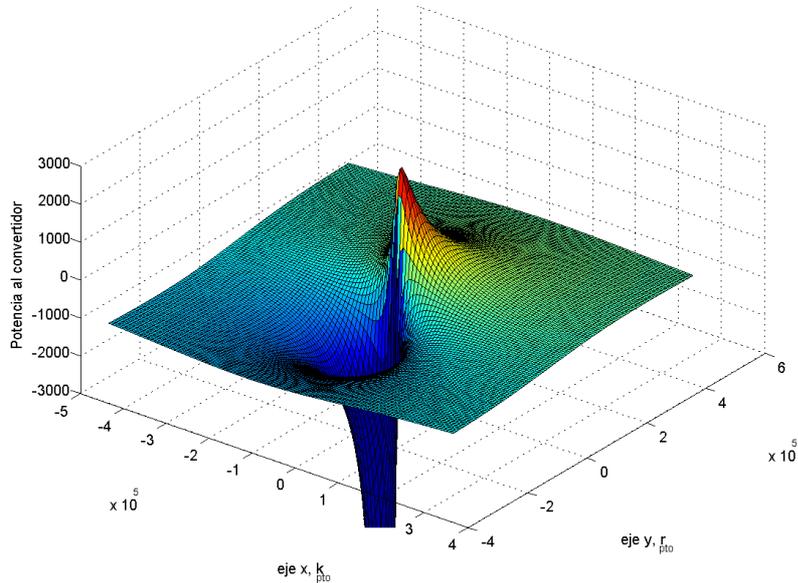


Figura 6.3: Potencia transferida al convertidor primario

En el próximo capítulo se calcularán los puntos significativos de dicha gráfica. Véase que a simple vista ya se puede apreciar la existencia de un valor máximo (máxima potencia enviada al convertidor de potencia), que se encuentra muy próximo a una asíntota. Esto implica que hay que prestar mucha atención a la estrategia de control, de manera que sean precisos los valores que se asignen a los parámetros de control, para permanecer en el punto máximo y evitar el desplazamiento hacia zonas donde el balance de energía hacia el convertidor resulta negativo.

6.4.3. Potencia transferida al convertidor de potencia

La figura 6.4 muestra la potencia media que puede ser transferida al convertidor de potencia cuando se aplican las estrategias de control pasivo y complejo-conjugado aproximado. Los balances de potencia negativos en el convertidor de potencia se han considerado nulos en dicha figura.

La potencia transferida al convertidor de potencia cuando se aplica el control complejo-conjugado aproximado resulta ser positiva sólo en algunos estados del oleaje situados en torno a la frecuencia de resonancia.

La estrategia de control ACC sólo es capaz de transferir potencia al

convertidor de potencia en un pequeño rango de periodos cercano al periodo natural, ya que las pérdidas del generador aumentan considerablemente cuando la frecuencia de la ola incidente se aleja de la frecuencia natural del sistema oscilante.

Obsérvese también que la potencia entregada al convertidor de potencia cuando se aplica la estrategia RLC también disminuye a medida que el periodo del oleaje se aleja de la frecuencia natural del sistema oscilante, o lo que es lo mismo, cuando se tiende hacia estados del oleaje de mayor potencial energético.

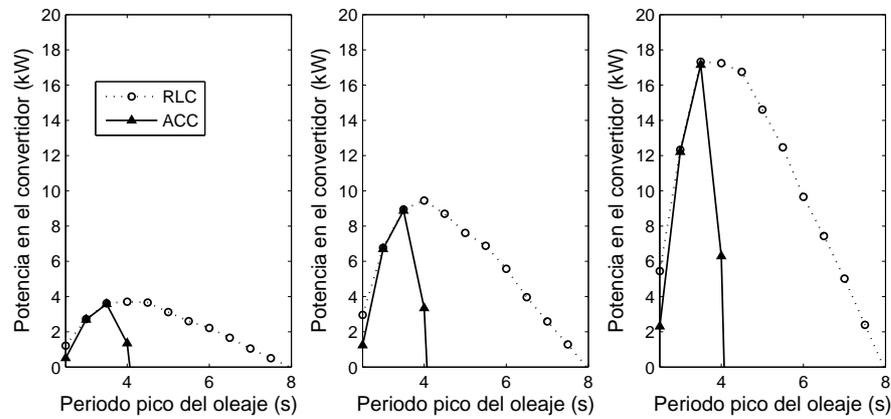


Figura 6.4: Potencia transferida al convertidor de potencia para cada estrategia, con alturas significantes (a) $H=1.4$ m (b) $H=2.2$ m (c) $H=3$ m

Tradicionalmente se ha considerado que el control pasivo permite extraer bajos niveles de potencia del mar, lo cual supone una desventaja. Sin embargo, estos ensayos ponen de manifiesto que, desde el punto de vista del convertidor de potencia, el control pasivo es capaz de transferir tanta potencia como el control complejo-conjugado aproximado, y trabajar en un rango de periodos más amplio.

6.4.4. Ratio entre la potencia pico y la potencia media

Los resultados relativos al ratio entre la potencia pico y la potencia media absorbida por el sistema de extracción de potencia, se presentan en la figura 6.5.

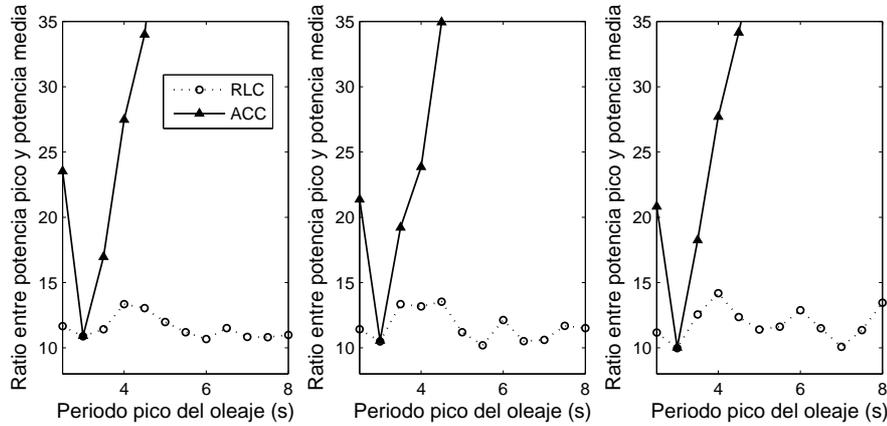


Figura 6.5: Ratio entre la potencia pico y la potencia media, con alturas significantes (a) $H=1.4$ m (b) $H=2.2$ m (c) $H=3$ m

Los ratios entre la potencia pico y la potencia media que se obtienen cuando se aplican la estrategia ACC, aumentan significativamente a medida que el periodo pico se aleja de la frecuencia natural del sistema oscilante, alcanzando valores inadmisibles para periodos alejados de la frecuencia natural. El umbral admisible podría ser 20 [81].

6.4.5. Amplitud y velocidad máxima del sistema oscilante

En este apartado, se analiza la dinámica asociada con el movimiento del sistema oscilante. Interesa que la velocidad del generador sea moderada, pues así se mantendría el impacto con los finales de carrera dentro de unos límites aceptables, alargando la vida útil del dispositivo.

La figura 6.6 muestra los valores de la velocidad máxima, mientras que la figura 6.7 muestra los correspondientes a la amplitud máxima. Nótese que cuando se aplica el control ACC, las velocidades que se obtienen, y las amplitudes requeridas, son extremadamente elevadas. En cambio, los valores alcanzados tanto para la velocidad como para la amplitud, son aceptables si se aplica el control pasivo.

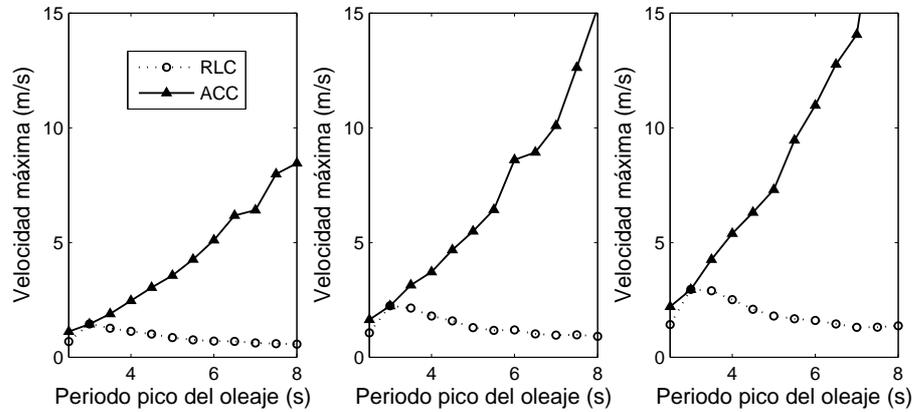


Figura 6.6: Velocidad máxima alcanzada por el sistema oscilante para cada estrategia, con alturas significantes (a) $H=1.4$ m (b) $H=2.2$ m (c) $H=3$ m

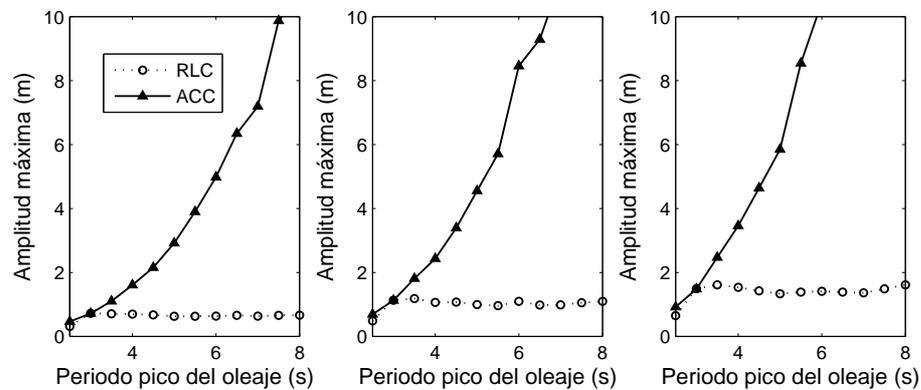


Figura 6.7: Amplitud máxima alcanzada por el sistema oscilante para cada estrategia, con alturas significantes (a) $H=1.4$ m (b) $H=2.2$ m (c) $H=3$ m

A medida que se reduce el rango de variación de estos parámetros, también se reduce el tamaño del dispositivo, y consecuentemente los costes asociados a su construcción, transporte e instalación.

6.5. Conclusiones

Aplicando la estrategia de control reactivo se maximiza la potencia capturada por el sistema de extracción de potencia. Sin embargo, existen diversos motivos que hacen inviable el uso del control reactivo convencional para el aprovechamiento de la energía de las olas:

- Conlleva la transferencia bidireccional de cantidades de energía prohibitivamente elevadas entre el sistema de extracción de potencia y el oleaje. Esto implica ratios entre potencia pico y potencia media muy elevados, lo que provoca un sobredimensionamiento del sistema de extracción de potencia y por tanto, la disminución de su rendimiento y el incremento de coste.
- Cuanto mayor sea la cantidad de energía transferida bidireccionalmente, mayores serán las pérdidas en el proceso de conversión, disminuyendo el rendimiento.
- Las aceleraciones y las velocidades que adquiere el sistema oscilante son muy elevadas, requiriendo dispositivos de final de carrera sofisticados y encareciendo el dispositivo.

Por motivos económico y prácticos, deberían evitarse las grandes excursiones, velocidades y aceleraciones de los cuerpos oscilantes, especialmente en situaciones de oleaje agitado. Podrían dar lugar a problemas de amarre o en los finales de carrera. Por ello, la técnica de control reactivo subóptimo debe aplicarse sólo en casos donde el oleaje sea moderado y la frecuencia predominante tenga un valor próximo a la frecuencia natural del sistema oscilante.

Falnes indicó en [11] que es necesario continuar investigando el control de absorbedores puntuales en cuanto a:

- el rango de amplitudes y aceleraciones que alcanza el cuerpo oscilante.
- Las fuerzas a las que se somete el sistema.
- Los niveles de potencia que se transfieren entre sus componentes.

Capítulo 7

Control Reactivo Mejorado

7.1. Introducción

En este capítulo se presenta el procedimiento que permite mejorar el control descrito en los capítulos anteriores, que en adelante se llamará *control reactivo mejorado*.

Para desarrollar el *control reactivo mejorado*, se maximiza la expresión de la potencia transferida al convertidor de potencia, que fue hallada en el capítulo anterior. Este objetivo difiere del control reactivo convencional,

cuyo fin consiste en maximizar la potencia capturada por el sistema de extracción de potencia. Se analizan los resultados obtenidos al aplicar del control reactivo mejorado a un WEC, en cuanto a potencia absorbida en el sistema de extracción de potencia, ratio entre potencia pico y potencia media, y características dinámicas de la instalación, tanto en oleaje regular como irregular. Además, dichos resultados se comparan con otras estrategias de control subóptimas. Finalmente, se analizarán los resultados obtenidos cuando se varían los siguientes parámetros característicos del sistema: el radio de la esfera, la resistencia del generador y el flujo de los imanes permanentes.

7.2. Procedimiento

Se implementa una estrategia de control reactivo mejorado que optimiza la potencia trasegada desde el generador al convertidor electrónico de potencia. Para ello, se incluirán las pérdidas en el cobre del generador lineal en el proceso de optimización. Existen otros tipos de pérdidas en el generador lineal [82] que no se considerarán en la formulación.

Aplicando esta estrategia de control mejorada, los intercambios de potencia reactiva entre el sistema oscilante y el generador pueden reducirse, y en consecuencia:

- la eficiencia del sistema aumenta considerablemente.
- el tamaño del convertidor de potencia disminuye.

Además, se verá que la resonancia no es el escenario del sistema oscilante donde se optimiza la extracción energética global.

Se presentará por tanto la formulación del método propuesto, así como los resultados basados en ella, en los que se pondrá de manifiesto las ventajas de la nueva estrategia de control en comparación con el control reactivo convencional.

7.3. Potencia máxima transferida al convertidor primario

Mediante la expresión (6.15) se obtiene la energía entregada al convertidor considerando la fuerza de excitación, las características hidrodinámicas del dispositivo oscilante, las características principales del generador lineal y los parámetros de control del sistema de extracción de potencia.

A continuación, se calculan analíticamente los parámetros de control $r_{pto}(\omega)$ y $x_{pto}(\omega)$ que maximizan esta energía. La fuerza de excitación no depende de la estrategia de control. Por tanto, los valores de los parámetros de la estrategia de control que maximizan la expresión (6.15) pueden obtenerse optimizando la siguiente función:

$$J_c = \frac{r_{pto}(\omega) - \delta |Z_{pto}(\omega)|^2}{|Z_{net}(\omega)|^2} \quad (7.1)$$

Teniendo en cuenta las condiciones de optimalidad, se debe cumplir que:

$$\frac{\partial J_c}{\partial r_{pto}(\omega)} = 0 \quad (7.2)$$

$$\frac{\partial J_c}{\partial x_{pto}(\omega)} = 0 \quad (7.3)$$

Las siguientes expresiones pueden obtenerse mediante un proceso de simplificación cuando (7.2) y (7.3) se aplican a (7.1), (ver apéndice A),

$$[1 - 2\delta r_{pto}(\omega)] |Z_{net}(\omega)|^2 - 2[r_{pto}(\omega) - \delta |Z_{pto}(\omega)|^2][r_{pto}(\omega) + b(\omega)] = 0 \quad (7.4)$$

$$\delta x_{pto}(\omega) |Z_{net}(\omega)|^2 + [r_{pto}(\omega) - \delta |Z_{pto}(\omega)|^2][x_{pto}(\omega) + x_i(\omega)] = 0 \quad (7.5)$$

trabajando con las expresiones anteriores, puede obtenerse la siguiente relación lineal entre $r_{pto}(\omega)$ y $x_{pto}(\omega)$, (ver apéndice A) :

$$[1 + 2\delta b(\omega)]x_{pto}(\omega) - 2\delta x_i(\omega)r_{pto}(\omega) + x_i(\omega) = 0 \quad (7.6)$$

En resumen, las condiciones de optimalidad de la ecuación (7.1), han dado lugar a un sistema de dos ecuaciones con dos incógnitas formado por las ecuaciones (7.4) y (7.5). Las incógnitas son $r_{pto}(\omega)$ y $x_{pto}(\omega)$. Posteriormente, se dedujo una relación lineal entre ambas variables, que viene dada por la expresión (7.3).

Inicialmente se calculará el valor que optimiza $r_{pto}(\omega)$. Para ello, se despejará $x_{pto}(\omega)$ de la expresión (7.3) y se sustituirá en (7.5), dando lugar a una ecuación de segundo grado, de la que se obtendrá $r_{pto}(\omega)$.

De (7.3), se tiene

$$x_{pto} = \frac{2\delta r_{pto} x_i - x_i}{1 + 2\delta b} \quad (7.7)$$

desarrollando $Z_{pto}(\omega)$ y $Z_{net}(\omega)$ en la expresión (7.5),

$$(x_{pto} + x_i)[r_{pto} - \delta(r_{pto}^2 + x_{pto}^2)] + [(b + r_{pto})^2 + (x_{pto} + x_i)^2]\delta x_{pto} = 0 \quad (7.8)$$

sustituyendo ahora (7.7) en (7.8), y reagrupando en términos de $r_{pto}(\omega)$, se tiene

$$(4b\delta^2 + 4\delta^3 x_i^2 + \delta + 4b^2\delta^3)r_{pto}^2 + (2b^2\delta^2 - 2\delta^2 x_i^2 + 4b^3\delta^3 + 4b\delta^3 x_i^2)r_{pto} - (\delta b^2 + 2b^3\delta^2 + 2b\delta^2 x_i^2) = 0 \quad (7.9)$$

Resolviendo (7.9), se llega a las dos soluciones siguientes:

$$r_{pto}^I(\omega) = -b(\omega) \quad (7.10)$$

$$r_{pto}^{II} = \frac{b(\omega) + 2\delta|Z_i(\omega)|^2}{\gamma} \quad (7.11)$$

en donde

$$\gamma = 4\delta^2|Z_i(\omega)|^2 + 4\delta b(\omega) + 1 \quad (7.12)$$

Sustituyendo ahora (7.10) y (7.11) en (7.7), se calculan los valores asociados de $x_{pto}(\omega)$:

$$x_{pto}^I(\omega) = -x_i(\omega) \quad (7.13)$$

$$x_{pto}^{II}(\omega) = \frac{-x_i(\omega)}{\gamma} \quad (7.14)$$

Quedan por tanto totalmente definidos los dos puntos que verifican las condiciones de optimalidad $[r_{pto}(\omega), x_{pto}(\omega)]$ de la expresión (6.15):

$$[r_{pto}(\omega), x_{pto}(\omega)] = \begin{cases} [-b(\omega), -x_i(\omega)] \\ [\frac{b(\omega)+2\delta|Z_i(\omega)|^2}{\gamma}, \frac{-x_i(\omega)}{\gamma}] \end{cases} \quad (7.15)$$

Si se sustituye la primera solución en la expresión en valor absoluto de (7.1), se tiene

$$|J_c| = (\frac{1}{|Z_{net}(\omega)|^2})(r_{pto}(\omega) - \delta|Z_{pto}(\omega)|^2) \rightarrow \infty \quad (7.16)$$

ya que

$$|Z_{net}(\omega)|^2 = (r_{pto}(\omega)+b(\omega))^2 + (x_{pto}(\omega)+x_i(\omega))^2 = (-b(\omega)+b(\omega))^2 + (-x_i(\omega)+x_i(\omega))^2 = 0 \quad (7.17)$$

Por lo tanto, la potencia enviada al convertidor presenta una asíntota vertical en el punto $(-b(\omega), -x_i(\omega))$.

La primera solución corresponde a una asíntota a $-\infty$. Esto significa que el valor máximo de la potencia transferida al convertidor, se alcanza para la segunda solución,

$$[r_{pto}(\omega), x_{pto}(\omega)] = [\frac{b(\omega) + 2\delta|Z_i(\omega)|^2}{\gamma}, \frac{-x_i(\omega)}{\gamma}] \quad (7.18)$$

Los valores de las consignas de control indicados en (7.18) corresponden a la aplicación del control reactivo mejorado. Estas consignas de control maximizan la potencia transferida al convertidor de potencia. Estas funciones son una generalización de las utilizadas por el control complejo-conjugado óptimo (5.14) y (5.15), que optimizan la potencia capturada por el sistema de extracción de potencia sin considerar las pérdidas. Por tanto, los valores de referencia utilizados por el control complejo-conjugado óptimo, pueden también deducirse a través del control reactivo mejorado si se considera nula la resistencia del generador, ($\delta=0$ y $\gamma(\omega)=1$).

Las dos soluciones indicadas en (7.15), se pueden observar en la gráfica 6.3. Una de ellas corresponde a la asíntota hacia $-\infty$ en $r_{pto} = -b$, y el máximo en $r_{pto} = \frac{b+2\delta|Z_i|^2}{\gamma}$.

De una manera similar a los pasos realizados en la sección 5.5.2,

correspondiente al control ACC, donde las funciones (5.14) y (5.15) se implementaron mediante una estrategia de control que utilizaba los parámetros definidos en (5.28), (5.30) y (5.31), a continuación estos parámetros se obtendrán para la estrategia propuesta.

La fuerza del sistema de extracción de potencia puede calcularse mediante una ecuación lineal de segundo orden que incluya los coeficientes asociados con la estrategia de control propuesta \hat{r}_{pto} , \hat{m}_{pto} y \hat{k}_{pto} .

Por tanto, una estrategia de control causal basada en las condiciones obtenidas podría alcanzarse ajustando los valores de los parámetros de control dados en (7.18), a una frecuencia adecuadamente elegida ω_k .

De esta manera, se obtienen las siguientes expresiones

$$\hat{r}_{pto} = \frac{b(\omega_k) + 2\delta[b^2(\omega_k) + x_i^2(\omega_k)]}{\gamma(\omega_k)} \quad (7.19)$$

y

$$\hat{x}_{pto} = \omega_k \hat{m}_{pto} - \frac{\hat{k}_{pto}}{\omega_k} = \frac{-\omega_k[m + m_{add}(\omega_k)] + \frac{c}{\omega_k}}{\gamma(\omega_k)} \quad (7.20)$$

El grado de libertad disponible cuando se ajustan los parámetros \hat{m}_{pto} y \hat{k}_{pto} , permite implementar diferentes estrategias de control. La estrategia resorte-amortiguamiento ha sido la considerada en la presente tesis, de manera que los valores de los coeficientes del sistema de extracción de potencia serán:

$$\hat{m}_{pto} = 0 \quad (7.21)$$

$$\hat{k}_{pto} = \frac{\omega_k^2[m + m_{add}(\omega_k)] - c}{\gamma(\omega_k)} \quad (7.22)$$

Los nuevos parámetros \hat{m}_{pto} y \hat{k}_{pto} se relacionan con los obtenidos mediante el control ACC equivalente, véanse las expresiones (5.30) y (5.31), mediante

$$\hat{m}_{pto} = \frac{\tilde{m}_{pto}}{\gamma(\omega_k)} \quad \hat{k}_{pto} = \frac{\tilde{k}_{pto}}{\gamma(\omega_k)} \quad (7.23)$$

Nótese cómo los nuevos parámetros propuestos en (7.19) y (7.22) se ajustan con los obtenidos mediante el control ACC (5.28) y (5.31) cuando no se consideran

las pérdidas en el generador durante el proceso de optimización ($\delta=0$ and $\gamma(\omega_k)=1$).

Los sistemas actuales de control reactivo implementados en WECs, basados en la estrategia convencional, pueden fácilmente ser sintonizados de manera que respondan a la nueva estrategia de control reactivo mejorado.

7.4. Resultados

7.4.1. Oleaje regular

A continuación, se exponen los resultados obtenidos en oleaje regular, es decir, la forma de onda de la fuerza de excitación del oleaje se considerará una senoide. Se ha considerado una altura de ola incidente constante $H = 1,3$ m y el periodo del oleaje incidente varía entre 2.5 y 8 s.

Potencia transferida al convertidor de potencia

La figura 7.1 muestra la potencia transferida al convertidor electrónico de potencia.

Nótese que si se tienen en cuenta las pérdidas del generador en la estrategia de control, el rendimiento del WEC mejora. Es más, cuanto más alejada se encuentra la frecuencia del oleaje incidente, de la natural del dispositivo oscilante, mayor es la mejora conseguida. Además, el rango de periodos del oleaje, o lo que es lo mismo, la gama de estados del mar donde el WEC consigue extraer potencia, aumenta, y por tanto su rendimiento también aumenta.

Nótese que aplicando el control óptimo, el rango de periodos donde el WEC presenta balances positivos y por tanto, puede extraer potencia de las olas, es considerablemente menor (0-4.1 s). Por contra, si el control propuesto se compara con el control pasivo, ambos son capaces de extraer potencia en un rango de estados del oleaje similar, pero la potencia que se consigue extraer aplicando control pasivo es menor en todo ese rango.

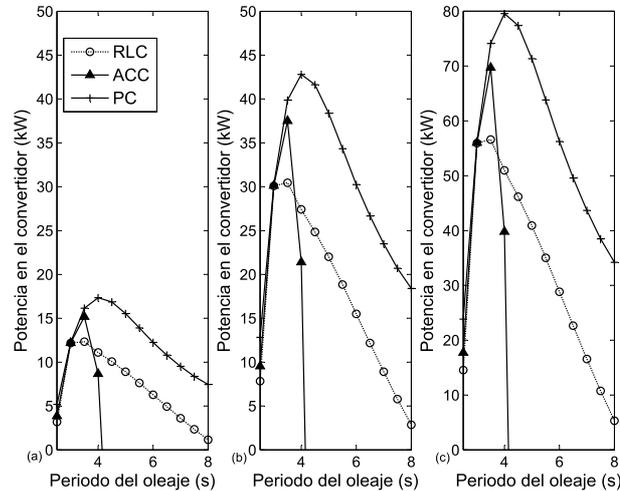


Figura 7.1: Potencia transferida desde el generador lineal al convertidor de potencia en oleaje regular, con alturas de ola (a) $H=1.4$ m (b) $H=2.2$ m (c) $H=3$ m

Potencia absorbida por el sistema de extracción de potencia

La figura 7.2 muestra la potencia entregada al sistema de extracción de potencia, que a su vez procede de la potencia interceptada por el dispositivo oscilante.

Nótese que la potencia extraída de las olas cuando se aplica el control óptimo, es generalmente mayor que la potencia obtenida mediante las restantes estrategias. Esto se debe a que el control óptimo persigue maximizar la potencia transferida desde el sistema oscilante al sistema de extracción de potencia.

Sin embargo, como ya se vio en el apartado anterior, la estrategia de control propuesta es la que generalmente más potencia transfiere desde el generador al convertidor de potencia, a pesar de que aplicándola, la potencia absorbida por el sistema de extracción de potencia sea menor.

Ratio entre la potencia pico y la potencia media

Entre otras consideraciones, los dispositivos que conforman una instalación se diseñan en función de la potencia media y la potencia máxima instantánea que fluye a través de ellos.

Por tanto, este último parámetro debe ser considerado en el diseño del WEC y especialmente, en los dispositivos correspondientes a la electrónica de potencia. Por esta razón, las estrategias de control deben evitar altos ratios

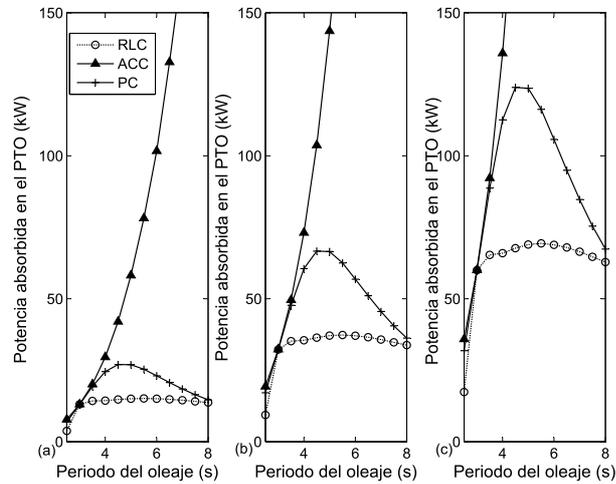


Figura 7.2: Potencia capturada por el sistema de extracción de potencia, con alturas de ola (a) $H=1.4$ m (b) $H=2.2$ m (c) $H=3$ m

entre la potencia pico y la potencia media en el sistema.

Una de las desventajas asociadas con la aplicación de las estrategias de control reactivo, es que presentan altos ratios entre la potencia pico y la potencia media, cuando el sistema opera a frecuencias alejadas de la frecuencia natural del sistema oscilante. La figura 7.3 muestra este ratio en oleaje regular, para el rango de periodos de oleaje considerado.

Nótese que el comportamiento del sistema es similar cuando el sistema oscila a la frecuencia de resonancia (que corresponde a un periodo de 2.8 s) independientemente de la estrategia elegida. En cambio, a medida que el periodo del oleaje aumenta, el ratio entre la potencia pico y la potencia media disminuye si se aplica el control propuesto. Esta mejora se acentúa a medida que la frecuencia del sistema oscilante se aleja de la frecuencia de resonancia.

Amplitud y velocidad del sistema oscilante

La dinámica asociada con el movimiento del sistema oscilante se analiza en este apartado. Las figuras 7.4 y 7.5 muestran los valores de la velocidad y amplitud máxima, que alcanza el sistema oscilante.

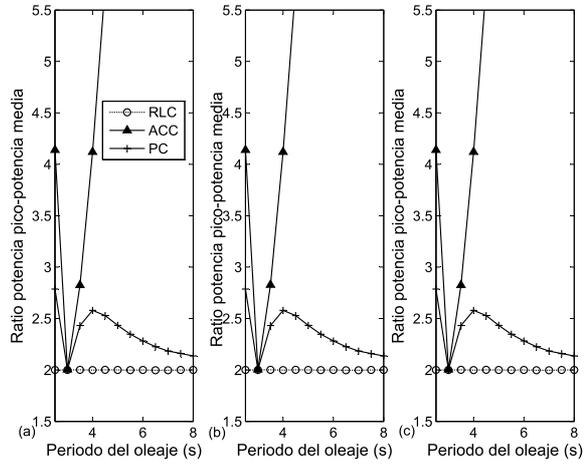


Figura 7.3: Ratio entre la potencia pico y la potencia media, con alturas de ola (a) $H=1.4$ m (b) $H=2.2$ m (c) $H=3$ m

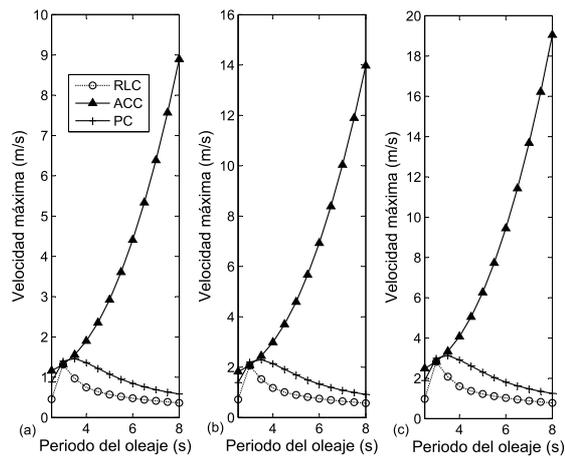


Figura 7.4: Máxima velocidad del sistema oscilante, con alturas de ola (a) $H=1.4$ m (b) $H=2.2$ m (c) $H=3$ m

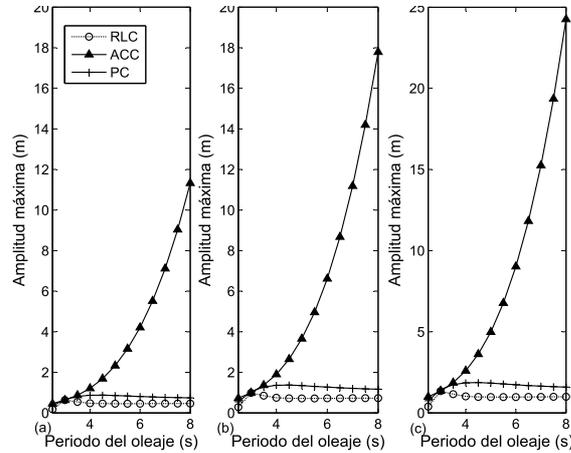


Figura 7.5: Máxima amplitud del sistema oscilante, con alturas de ola (a) $H=1.4$ m (b) $H=2.2$ m (c) $H=3$ m

Nótese que una de las principales dificultades que conlleva la implementación de estrategias basadas en el control complejo-conjugado, son las elevadas velocidades y amplitudes que alcanza el sistema oscilante. Este problema se acentúa a medida que el periodo del oleaje aumenta.

Por otro lado nótese que, al aplicarse el control pasivo o el propuesto, el sistema oscilante alcanza la velocidad y la excursión más alta en un punto cercano al periodo natural. Estos parámetros disminuyen a medida que el periodo del oleaje aumenta.

Si se reduce el rango de variación de estos parámetros, se reduce también el tamaño del WEC, y por tanto los costes asociados a la construcción, transporte e instalación.

7.4.2. Oleaje irregular

A continuación, se exponen los resultados obtenidos en oleaje irregular.

Potencia transferida al convertidor de potencia

La figura 7.6 muestra la potencia que puede ser transferida al convertidor de potencia. Los balances de potencia negativos en el convertidor de potencia se han considerado nulos en la figura.

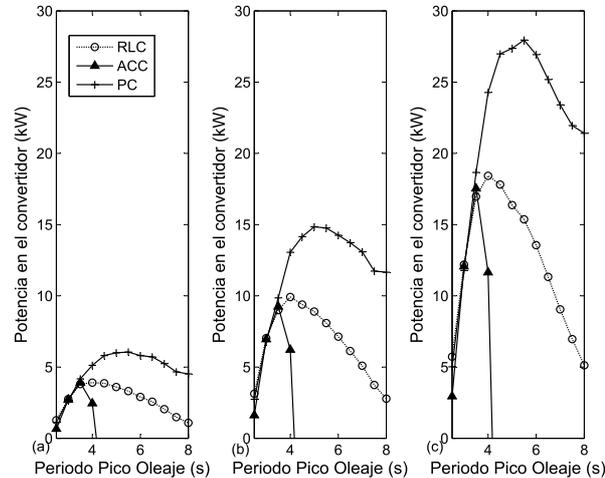


Figura 7.6: Potencia transferida al convertidor de potencia para cada estrategia, con alturas significantes (a) $H=1.4$ m (b) $H=2.2$ m (c) $H=3$ m

Los resultados arrojados por las tres estrategias son similares en rangos de periodo de oleaje bajo. En cambio, el control propuesto (PC) generalmente presenta los mejores resultados en estados de oleaje más energéticos, es decir, de mayor periodo pico. La estrategia de control ACC sólo es capaz de transferir potencia al convertidor de potencia en un pequeño rango de periodos cercano al periodo natural, ya que las pérdidas del generador aumentan considerablemente cuando la frecuencia de la ola incidente se aleja de la frecuencia natural del sistema oscilante.

La potencia entregada al convertidor de potencia cuando se aplica la estrategia propuesta en un rango de periodos del oleaje elevado, llega a ser varias veces superior a la que se entrega cuando se aplica la estrategia RLC.

Potencia absorbida por el sistema de extracción de potencia

La figura 7.7 muestra la potencia media que puede ser absorbida por el sistema de extracción de potencia en el rango de periodos considerado, en función de la estrategia que se aplique.

Nótese que la máxima extracción de potencia ocurre cuando se aplica el control ACC, porque el propósito de esta estrategia es maximizar la energía absorbida por el sistema de extracción de potencia. Por contra, la potencia transferida al convertidor de potencia resulta ser positiva sólo en algunos

estados del oleaje situados en torno a la frecuencia de resonancia, ver figura 7.6.

Además, los niveles de potencia entregados al convertidor de potencia cuando la estrategia de control propuesta se aplica (figura 7.6) se obtienen sin necesidad de que se alcancen los elevados niveles de potencia absorbidos en el sistema de extracción de potencia que tienen lugar cuando se aplica la estrategia de control ACC (Figura 7.7).

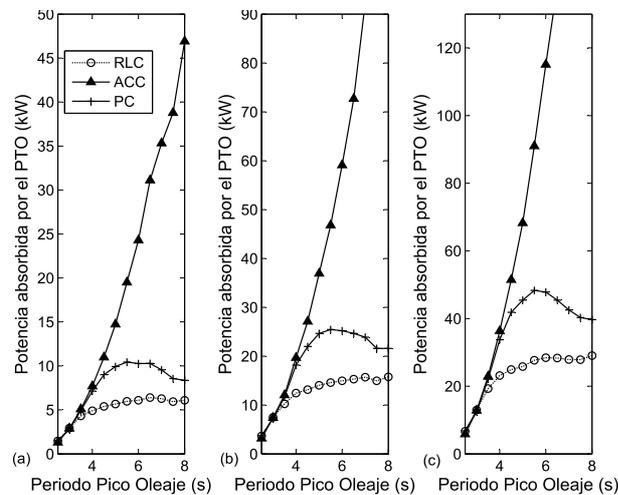


Figura 7.7: Potencia absorbida por el sistema de extracción de potencia para cada estrategia, con alturas significantes (a) $H=1.4$ m (b) $H=2.2$ m (c) $H=3$ m

Ratio entre potencia pico y potencia media

Los resultados asociados con el ratio entre la potencia pico y la potencia media absorbidas por el sistema de extracción de potencia se muestran en la figura 7.8.

Los ratios entre potencia pico y potencia media obtenidos cuando se aplica el control ACC, aumentan significativamente cuando el periodo pico se aleja de la frecuencia natural del sistema oscilante, alcanzando valores inadmisibles para periodos alejados de la frecuencia natural.

En cambio, nótese que los ratios entre potencia pico y potencia media al aplicarse la estrategia de control propuesta, resultan ser sólo un poco más elevados que los que tienen lugar cuando se aplica la estrategia RLC. Además, dichos ratios disminuyen a medida que el periodo pico se aleja de la frecuencia natural del sistema.

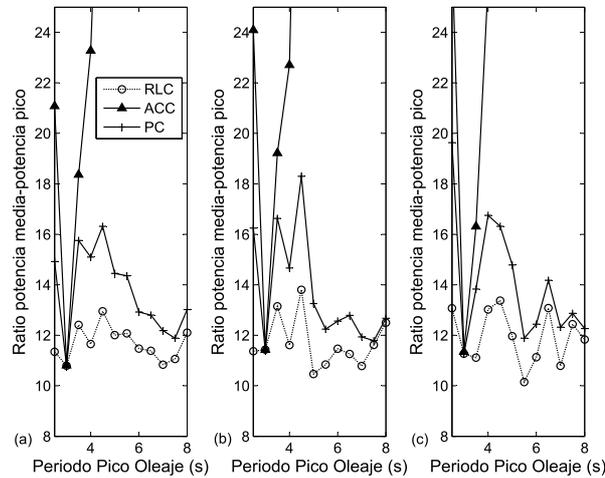


Figura 7.8: Ratio entre la potencia pico y la potencia media, con alturas significantes (a) H=1.4 m (b) H=2.2 m (c) H=3 m

Amplitud y velocidad de oscilación

Las figuras 7.9 y 7.10 muestran la máxima amplitud y velocidad alcanzadas por el dispositivo oscilante en función de la estrategia de control aplicada.

El comportamiento dinámico del sistema oscilante cuando se aplica la estrategia de control ACC presenta el peor rendimiento, alcanzando valores inadmisibles para periodos elevados. Por otro lado, tanto la estrategia propuesta como la RLC presentan valores admisibles.

Si se analizan periodos de oleaje elevados, donde los niveles de potencia del oleaje son mayores, el ratio entre la potencia entregada al convertidor de potencia (Fig. 7.6), y la velocidad o amplitud máxima del sistema oscilante (Fig. 7.9 y 7.10) presenta valores más elevados cuando se aplica la estrategia propuesta.

Por ejemplo, si se consideran amplitudes, el ratio obtenido por la estrategia de control RLC está en torno a $(13/1 \approx 13 \text{ kW/m})$, mientras que el ratio obtenido por la estrategia de control propuesta ronda $(28/2 \approx 14 \text{ kW/m})$ cuando el periodo pico y la altura de ola significativa considerados son 6 s y 3 m respectivamente. Esta diferencia se incrementa a medida que se analizan estados de oleaje más energéticos.

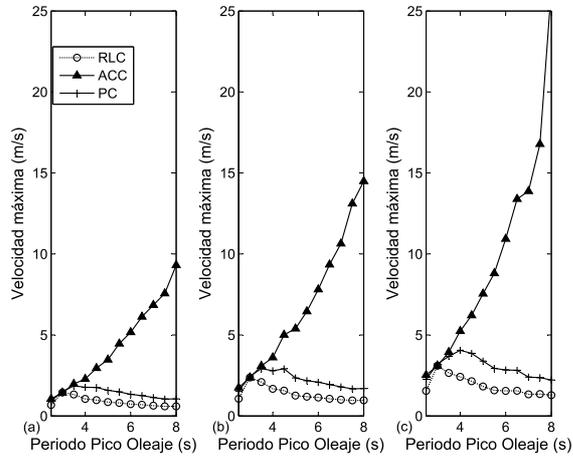


Figura 7.9: Velocidad máxima alcanzada por el sistema oscilante para cada estrategia, con alturas significantes (a) $H=1.4$ m (b) $H=2.2$ m (c) $H=3$ m

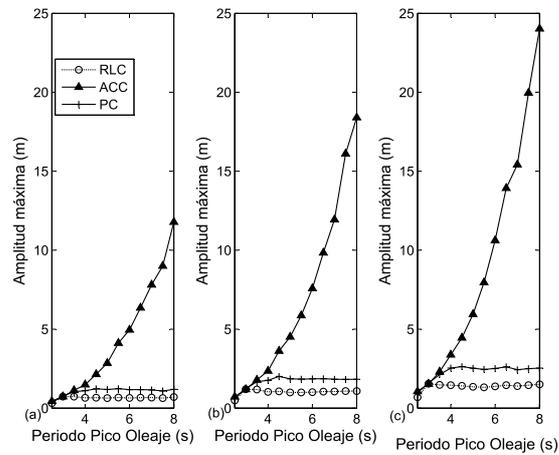


Figura 7.10: Amplitud máxima alcanzada por el sistema oscilante para cada estrategia, con alturas significantes (a) $H=1.4$ m (b) $H=2.2$ m (c) $H=3$ m

7.5. Análisis de la sensibilidad

En este apartado, se verá cómo evoluciona, en oleaje regular, el rango de periodos donde el WEC puede trabajar cuando se aplica control reactivo

convencional y la potencia que es capaz de enviar al convertidor de potencia cuando se aplica el control reactivo mejorado, cuando varía:

- el radio del dispositivo oscilante.
- la resistencia del generador lineal.
- el flujo de los imanes permanentes.

7.5.1. Respuesta del sistema en función del radio de la esfera

La tabla 7.1 muestra los resultados obtenidos cuando se modifica el radio de la esfera, manteniendo constante la resistencia del generador en 0.45Ω .

Radio (m)	$T_{min}(s)$	$T_{max}(s)$	$\Delta T(s)$	$T_m(s)$	P(kW)	$T_p(s)$
1.0	1.20	3.04	1.84	2.72	6.2	2.90
2.5	2.44	3.59	1.15	4.24	10.0	3.04
5	3.84	4.24	0.40	5.97	17.2	4.04

Cuadro 7.1: Potencia transferida al convertidor y periodos en función del radio de la esfera

donde:

- $T_{min}(s)$ es el periodo de oleaje mínimo donde la potencia que se transfiere al convertidor electrónico es positiva cuando se aplica el control reactivo.
- $T_{max}(s)$ es el periodo de oleaje máximo donde la potencia que se transfiere al convertidor electrónico es positiva cuando se aplica el control reactivo.
- $\Delta T(s)$ es el rango de periodos de trabajo comprendido entre $T_{min}(s)$ y $T_{max}(s)$.
- $T_m(s)$ es el valor medio del rango de periodos de trabajo.
- $P(kW)$ representa la potencia máxima que puede ser entregada al convertidor primario cuando se aplica el control reactivo mejorado.
- $T_p(s)$ es el valor del periodo de oleaje donde $P(kW)$ tiene lugar.

Sólo se tendrán en cuenta los valores de periodo donde la potencia extraída sea positiva, con el fin de limitar el estudio al área donde el WEC puede extraer potencia.

Cuando el radio de la esfera aumenta, el rango de periodos de trabajo disminuye pero la potencia máxima transferida al convertidor de potencia aumenta. Por tanto, cuando el tamaño del dispositivo aumenta, el rango de periodos donde se puede extraer energía del oleaje disminuye.

Nótese también que, cuando el radio aumenta, también lo hace el valor medio del rango de periodos (T_m) y la frecuencia natural del dispositivo. Esto significa que, a medida que aumenta el tamaño del WEC, el rango de periodos donde se extrae potencia se desplaza hacia la derecha, es decir, hacia periodos mayores.

Por tanto, el valor medio del rango de periodos de trabajo depende del tamaño del dispositivo. Cuando el radio de la esfera aumenta un 100 %, T_m (s) también aumenta en torno a un 41 %. Por otro lado, cuando el radio de la esfera disminuye un 60 %, T_m (s) disminuye también en torno al 36 %.

7.5.2. Sensibilidad a la resistencia del generador

La tabla 7.2 muestra los resultados que se obtienen al variar la resistencia del generador, considerando una esfera de radio 2.5 m.

Resistencia(Ω)	T_{min} (s)	T_{max} (s)	ΔT (s)	T_m (s)	P(kW)	T_p (s)
0.2	2.00	4.04	2.04	3.04	3.44	11.24
0.45	2.44	3.59	1.15	2.37	3.04	10.02
0.7	2.34	3.40	1.06	2.23	2.84	9.52

Cuadro 7.2: Potencia transferida al convertidor y periodos en función de la resistencia del generador

Cuando la resistencia del generador aumenta, el rango de periodos donde se extrae potencia y la potencia máxima transferida al convertidor electrónico disminuyen. Por tanto, la potencia eléctrica que puede inyectarse a la red disminuye.

La tabla 7.2 muestra que si la resistencia del generador aumenta por encima del 50 %, la potencia transferida al convertidor primario sólo disminuye el 5 %, mientras que si se aumentase la sección del cable, y por tanto la resistencia se

redujese un 50 %, se podría inyectar a red, alrededor de un 12 % de potencia adicional.

Nótese también que cuando la resistencia aumenta, el rango de periodos donde se puede extraer potencia disminuye. También se observa que si la resistencia del generador aumenta por encima del 50 %, el ancho de banda disminuye en torno al 8 %, mientras que si la resistencia se reduce más del 50 %, el ancho de banda aumenta en torno al 78 %.

7.5.3. Sensibilidad al flujo de los imanes permanentes

La tabla 7.3 muestra los resultados que se obtienen al variar el flujo de los imanes permanentes, considerando una esfera de radio 2.5 m.

ψ (H)	T_{min} (s)	T_{max} (s)	ΔT (s)	T_m (s)	P(kW)	T_p (s)
3.31	2.30	3.30	1.00	2.15	2.84	9.5
4.14	2.44	3.59	1.15	2.37	3.04	10.0
4.97	2.20	3.70	1.50	2.60	3.05	10.4

Cuadro 7.3: Potencia transferida al convertidor y periodos en función del flujo de los imanes permanentes

Cuando el flujo de los imanes permanentes aumenta, el rango de periodos donde se extrae potencia y la potencia máxima transferida al convertidor electrónico aumentan.

La tabla 7.3 muestra que si el flujo de los imanes permanentes aumenta un 20 %, la potencia transferida al convertidor primario sólo aumenta el 4 %, mientras que si el flujo de los imanes permanentes se redujese un 20 %, la potencia inyectada a red se reduciría en torno a un 5 %.

Nótese también que cuando el flujo de los imanes permanentes aumenta, el rango de periodos donde se puede extraer potencia aumenta. La tabla 7.3 muestra que si el flujo de los imanes permanentes aumenta un 20 %, el ancho de banda aumenta en torno al 31 %, mientras que si el flujo de los imanes permanentes se reduce en torno al 20 %, el ancho de banda se reduce en torno al 13 %.

7.6. Conclusiones

En este capítulo, las pérdidas en el cobre del generador se han tenido en cuenta en la estrategia de control del generador lineal de imanes permanentes para la conversión de la energía undimotriz. La estrategia propuesta maximiza la potencia transferida desde el generador lineal al convertidor de potencia, con el fin de mejorar la eficiencia global del sistema de generación de potencia.

Las condiciones óptimas que maximizan esta potencia han sido calculadas y, a partir de ellas, se ha desarrollado una estrategia causal basada en un sistema lineal de extracción de potencia de segundo orden.

Se ha comparado el rendimiento del WEC cuando se aplica la estrategia de control propuesta, con el obtenido cuando se aplican el control complejo-conjugado aproximado y el control pasivo. Se ha demostrado que cuando el WEC se somete a la estrategia de control propuesta, alcanza generalmente eficiencias de conversión mayores ya que las pérdidas del generador se reducen significativamente y, en oleaje irregular, los WECs son capaces de trabajar en un rango de frecuencias más ancho. Además, los ratios de potencia pico frente a potencia media decrecen, de manera que el tamaño del convertidor de potencia es menor, por lo que el coste de la planta también disminuye. Estas mejoras aumentan a medida que el punto de operación del WEC se aleja de la frecuencia natural del sistema oscilante. Por otro lado, se consiguen también ventajas mecánicas en el diseño del WEC, ya que las velocidades y las excursiones máximas de las partes móviles disminuyen cuando se implementa la estrategia de control propuesta.

Nótese por tanto que las desventajas asociadas al control reactivo convencional señaladas en el apartado 6.5, quedan atenuadas si se aplica la estrategia de control reactivo mejorado propuesta en la presente tesis.

Capítulo 8

Conclusiones y Futuras Líneas de Investigación

8.1. Resumen y conclusiones

En esta tesis se aborda el problema del gobierno de un absorbedor puntual de accionamiento directo mediante un generador lineal, aplicando una estrategia mejorada de la técnica del control reactivo.

La nueva estrategia de control propuesta en esta tesis considera las pérdidas en el cobre del generador lineal. En el trabajo desarrollado, en primer lugar se ha conseguido relacionar las pérdidas en el cobre del generador con las características hidrodinámicas del sistema oscilante. De esta forma, ha sido posible establecer las condiciones óptimas de extracción de energía del oleaje considerando estas pérdidas. Las condiciones óptimas obtenidas resultan no causales, por lo que finalmente se ha propuesto una estrategia de control sub-óptima a partir de las condiciones anteriores.

Tras las simulaciones realizadas, se han comprobado las ventajas de la nueva estrategia aplicada sobre el generador lineal de imanes permanentes, habitualmente utilizado en los sistemas de conversión de energía de las olas.

El modelo desarrollado permite calcular, y por lo tanto cuantificar, no la energía capturada por el sistema oscilante, sino la que se transfiere desde el generador lineal hacia el convertidor de potencia.

De esta forma, en la tesis se pone de manifiesto que el control reactivo convencional puede ser ineficiente si se tienen en cuenta las pérdidas en el cobre del generador lineal.

A diferencia del proceso de optimización del control reactivo convencional,

donde se busca maximizar la potencia absorbida por el sistema oscilante, la estrategia propuesta busca maximizar la potencia transferida desde el generador lineal al convertidor electrónico.

La estrategia de control ha sido simulada en una plataforma donde se han incorporado los parámetros de la instalación real de Lisekyl (Universidad de Uppsala). Los resultados obtenidos muestran cómo, al aplicar la estrategia de control propuesta, los intercambios de potencia reactiva a través del generador lineal también son menores que aplicando el control reactivo convencional, lo que significa que:

- Disminuyen las pérdidas en el generador, con lo que se incrementa la eficiencia de conversión y por lo tanto, de la instalación.
- Disminuye el tamaño del convertidor de potencia, con lo que se reduce la inversión necesaria.
- Aumenta la amplitud del ancho de banda donde el WEC puede extraer potencia del mar, con lo que se incrementa el número de ubicaciones marinas donde el WEC se puede situar.

Estas mejoras aumentan a medida que el punto de operación del WEC se aleja de la frecuencia natural del sistema oscilante.

En las simulaciones puede observarse cómo, al aplicar el control propuesto, se mejora significativamente la potencia entregada en relación a los valores alcanzados por las otras dos estrategias (pasivo RLC y complejo conjugado aproximado ACC). Además, comparando el comportamiento de la estrategia propuesta PC con el control ACC, se amplía el rango de estados de oleaje donde es posible extraer potencia por el dispositivo WEC.

Por otro lado, las simulaciones realizadas muestran cómo, al emplear la técnica de control propuesta, se consigue por una parte reducir la potencia absorbida por el sistema oscilante mientras que por otra se incrementa de manera significativa la potencia entregada al convertidor de potencia. A su vez, también se consigue reducir sensiblemente el ratio entre la potencia pico y la potencia medida, relajándose de esta forma las condiciones de operación a las que están sometidos todos los equipos que integran el sistema extractor de potencia.

Adicionalmente, aplicando el control reactivo propuesto, se obtienen ventajas mecánicas en cuanto al diseño del WEC, ya que

- Se reduce la velocidad máxima del sistema oscilante, con todas las ventajas mecánicas que esto conlleva en cuanto a diseño del dispositivo

WEC y vida útil de sus componentes, especialmente los que integran el sistema oscilante.

- Se reduce la carrera (amplitud) máxima del sistema oscilante, lo que conlleva una reducción en el tamaño del dispositivo oscilante y, consecuentemente, ahorro de material en guías, elementos deslizantes, perfilería, etc.

Finalmente, señalar que con la formulación desarrollada se ha podido comprobar cómo el control reactivo convencional es una particularización del control reactivo mejorado propuesto en esta tesis, que se obtiene al desprestigiar las pérdidas en el generador lineal.

8.2. Aportaciones originales

La metodología desarrollada en esta tesis contribuye al análisis y maximización de la energía transferida a la red por un WEC del tipo absorbedor puntual, con las siguientes aportaciones originales:

- Desarrollo de la formulación necesaria para poder cuantificar la cantidad de energía que se transfiere al convertidor de potencia durante el funcionamiento de un absorbedor puntual.
- Formulación de las pérdidas eléctricas en el cobre del generador lineal en función de variables hidrodinámicas.
- Definición de un modelo de control reactivo que maximiza la energía inyectada en la red eléctrica.
- La dimensión del modelo generado permite generalizar el control reactivo convencional.

A raíz de todo lo anterior se puede afirmar que:

No es conveniente aplicar el control reactivo convencional para gobernar un absorbedor puntual

La resonancia no es el estado del sistema oscilante donde se optimiza la extracción de energía global

El control reactivo mejorado disminuye sensiblemente los inconvenientes tradicionalmente asociados a la aplicación del control reactivo convencional

8.3. Listado de publicaciones

A. García y A. de la Villa: Generación Eléctrica en Centrales Undimotrices. *Revista Energía*, Noviembre de 2007.

A. García y A. de la Villa: Generación Eléctrica mediante convertidores de las olas oscilantes rotativos. *Revista Infopower*, Enero de 2008.

A. García, D. Montoya and A. de la Villa: Control of Hydrodynamic Parameters of Wave Energy Point Absorbers using Linear Generators and VSC-based Power Converters Connected to the Grid. *Third International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'10)*, Granada (Spain), 23rd to 25th March, 2010.

A. García, D. Montoya and A. de la Villa: Output power of linear generators under reactive control in regular waves. *Ninth International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'11)*, Las Palmas de G.C., Spain, April 2011.

El artículo anterior fue premiado como uno de los tres más destacados de dicho Congreso.

A. de la Villa, A. García and D. Montoya: Maximizing output power of linear generators for wave energy conversion. *International Transactions on Electrical Energy Systems (anteriormente denominada ETEP, European Transactions on Electrical Power)*, April 2013. Impact Factor 0.63.

8.3.1. Otras colaboraciones del autor

A continuación, se relacionan diversos trabajos de colaboración realizados por el autor en el área de generación undimotriz. El contenido de estos trabajos no ha sido incorporado en la presente Tesis Doctoral.

D. Montoya, A. García and A. de la Villa: Frequency-matching assessment under reactive control on wave energy converters. *Fourth International Conference on Ocean Energy (ICOE)*, Dublin, Ireland, October 2012.

A. de la Villa, D. Montoya and A. García: Increasing the Efficiency of the

Passive Loading Strategy for Wave Energy Conversion. *Journal of Renewable and Sustainable Energy. Impact Factor 1.514*.

D. Montoya, A. de la Villa and A. García: Considering Linear Generator Copper Losses on Model Predictive Control for a Point Absorber Wave Energy Converter. *Energy Conversion and Management Journal, Elsevier. Impact Factor 2.775*.

8.4. Futuras líneas de investigación

Como continuación del trabajo desarrollado en la presente tesis, se proponen las siguientes líneas de investigación:

- Analizar la posible restricción de los grados de libertad existentes (m_{pto} y k_{pto}) con el fin de incrementar la potencia entregada a la red eléctrica.
- Integración de otras pérdidas que pudieran darse antes de la inyección a red, como las pérdidas en el núcleo de hierro del generador lineal, en el convertidor de potencia y las pérdidas en los convertidores electrónicos de potencia. Se debe por tanto ajustar la formulación presentada para que dichas pérdidas sean contempladas.
- Análisis de la posibilidad de aplicar estas técnicas a otros WECs que no sean absorbedores puntuales.
- Desarrollo de técnicas de cálculo que permitan reducir el tiempo computacional empleado en las simulaciones del convertidor de energía de las olas.

Bibliografía

- [1] Previsic M., Bedard R., Hagerman G., “Offshore Wave Energy Conversion Devices”, *Electric Power Research Institute (EPRI)*, Report E2I EPRI WP-004-US-Rev 1, Palo Alto (USA), June 2004.

- [2] Johnstone C.M. et al., “EC FPVI coordinated action on ocean energy: A European platform for sharing technical information and research outcomes in wave and tidal energy systems”, *Renewable Energy*, Vol. 31, pp. 191-196, 2006.

- [3] Bernshtein L.B., “Tidal power development - A realistic, justifiable and topical problem of today”, *IEEE Trans. on Energy Conversion*, Vol. 10, No. 3, pp. 591-599, September 1995.

- [4] Jones A.T. et al., “Recent progress in offshore renewable energy technology development”, *Proceedings of IEEE PESGM'05*, Vol. 2, pp. 2017-2022, San Francisco (USA), June 2005.

- [5] Ramakumar R. et al., “Economic aspects of advanced energy technologies”, *Proc. IEEE*, Vol. 3, No. 8, pp. 318-332, March 1993.

- [6] Heydt G.T., “An assessment of ocean thermal energy conversion as an advanced electric generation methodology”, *Proc. IEEE*, Vol. 3, No. 8, pp. 409-418, March 1993.
- [7] Thorpe T.W., “2004 Wave energy Survey of Energy Resources”, *World Energy Council*, ch. 15, pp. 401-417, Montreal, Canada, 2004.
- [8] Thorpe T.W., “An overview of wave energy technologies: Status, performance and costs”, in *Wave Power: Moving towards Commercial Viability*, London, 1999.
- [9] Mueller M.A., “Electrical generators for direct drive wave energy converters”, *IEE Proc. C Gener. Transm. Distrib.*, Vol. 149, No. 4, pp. 446-456, July 2002.
- [10] Baker N.J., Mueller M.A. and Brooking P.R.M., “Electrical power conversion in direct drive wave energy converters”, *5th European Wave Energy Conf.*, pp. 197-204, Cork (Ireland), September 2003.
- [11] Falnes J., “Optimum control of oscillation of wave-energy converters”, *Annex Report B1 to the Joule project titled Wave Energy Converters: Generic Technical Evaluation Study*, Paper no. 2, June 1993.
- [12] Korde U.A., “Control system applications in wave energy conversion”, *OCEANS 2000 MTSIEEE Conf. and Exhib.*, Vol. 3, pp. 1817-1824, September 2000.
- [13] Greenhow M., White S.P., “Optimal heave motion of some axisymmetric wave energy devices in sinusoidal waves”, *Applied Ocean Research*, Vol. 19, No. 3-4, pp. 141-159, June-August 1997.

- [14] Shek J.K.H., Macpherson D.E., Mueller M.A., Xiang J., “Reaction force control of a linear electrical generator for direct drive wave energy conversion”, *IET Journal of Renewable Power Generation*, Vol. 1, No. 1, pp. 17-24, March 2007.
- [15] Salter S.H., “Wave Power”, *Nature*, Vol. 249, pp. 720-724, June 1974.
- [16] Mollison D., Buneman O.P., Salter S.H., “Wave power availability in the NE atlantic”, *Nature*, Vol. 263, pp. 223-226, September 1976.
- [17] Federal Ministry for Economic Cooperation and Development and Ministry for the Environment, *International Conference for Renewables Energies: Nature Conservation and Nuclear Safety*, Bonn, p. 27, 2004.
- [18] Falnes J., “Ocean Waves and Oscillating Systems”, Cambridge University Press, April 2002.
- [19] Cruz J., “Ocean Wave Energy. Current Status and Future Perspectives”, ed. Springer-Verlag, February 2008.
- [20] Archipelago Website; <http://www.archipelago.co.uk/our-work/wave-power-animation>.
- [21] Gato L.M.C. and Falcão A.F. de O., “Aerodynamics of the Wells turbine”, *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 30, pp. 383-395, 1988.
- [22] Pereiras B., Castro F., el Marjani A., Rodríguez M.A., “An improved radial impulse turbine for OWC”, *Renewable Energy*, Vol. 36, No. 5, pp. 1477-1484, 2011.
- [23] Oceanlinx Website; <http://www.oceanlinx.com/technology/products/bluewave>.
- [24] WaveRoller Website; <http://www.aw-energy.com/>.

- [25] Oyster Website; <http://www.aquamarinepower.com/>.
- [26] Langlee Website; <http://www.langleewavepower.com/en/>.
- [27] Wavestar Website; <http://wavestarenergy.com/>.
- [28] Weptos Website; <http://www.weptos.com/es/>.
- [29] Pelamis Website; <http://www.pelamiswave.com/>.
- [30] Uppsala university Website; <http://www.el.angstrom.uu.se/forskningsprojekt/WavePower/>.
- [31] Boström C., Svensson O., Rahm M., Lejerskog E., Savin A., Strömstedt E., Engstrom J., Gravrakmo H., Haikonen K., Waters R., Bjorklof D., Johansson T., Sundberg J., Leijon M., “Design proposal of electrical system for linear generator wave power plants”, *M. Industrial Electronics, IECON '09.*, pp. 4393 - 4398, 2009.
- [32] Boström C., Lejerskog E., Tyrberg S., Bolund B., Leijon M., Eriksson M., Svensson O., Waters R. and Savin A., “Experimental Results From an Offshore Wave Energy Converter”, *Applied Physics Letters*, Vol. 90, No. 3, pp. 034105-3, 2007.
- [33] Prudell J., Stoddard M., Amon E., Brekken T.K.A., von Jouanne A., “A Permanent-Magnet Tubular Linear Generator for Ocean Wave Energy Conversion”, *IEEE Trans. on Industry Applications*, Vol. 46, No.6, pp. 2392-2400, 2010.
- [34] SSG Website; <http://www.waveenergy.no/WorkingPrinciple.htm>.
- [35] Wave Dragon Website; <http://www.wavedragon.net/>.

-
- [36] F. de O. Falcão, A., “Wave energy utilization: A review of the technologies”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews, Elsevier*, Vol. 14, No. 3, pp. 899-918, 2010.
- [37] Budal K., Falnes J. Optimum operation of improved wave-power converter. *Marine Science Communications* 1977; **3**(2):133-150.
- [38] Falnes J., Budal K., “Wave power conversion by point absorbers”, *Norwegian Maritime Research*, Vol. 6, No. 4, pp. 2-11, 1978.
- [39] Naito S., Nakamura S., “Wave energy absorption in irregular waves by feed-forward control system”, *Hydrodynamics of Ocean Wave-Energy Utilization, IUTAM Symposium, Lisbon, Springer-Verlag, Berlin*, pp. 269–280, 1985.
- [40] Falnes J., “Principles for capture of energy from ocean waves. Phase control and optimum oscillation”, Department of Physics, NTNU, N-7034 Trondheim, Norway, 1993.
- [41] Price A., “New Perspectives on Wave Energy Converters”, *Ph.D. dissertation*, University of Edinburgh, March 2009.
- [42] Nebel P., “Maximizing the efficiency of wave-energy plants using complex-conjugate control”, *Journal of Systems and Control Engineering*, Vol. 206, No. 4, pp. 225-236, 1992.
- [43] Fusco F. and Ringwood J.V., “A Study of the Prediction Requirements in Real-Time Control of Wave Energy Converters”, *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, Vol. 3, No. 1, pp. 176-184, 2012.
- [44] García A., Montoya D., De La Villa A., “Output power of linear generators under reactive control in regular waves”, *Nineth International Conference on*

- Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ)*, Las Palmas de G.C., Spain, April 2011.
- [45] Tedeschi E., Molinas M., “Effect of control strategies and power take-off efficiency on the power capture from sea waves”, *IEEE Trans. Energy Conversion*, Vol. 26, No. 4, pp. 1088-1098, 2011.
- [46] Budal K., Falnes J., “Power Generation From Ocean Waves Using a Resonant Oscillating System”, *Marine Science Communication*, Vol. 1, No. 3 and 4, pp. 269-288, 1975.
- [47] Budal K., Falnes J., “A resonant point absorber of ocean-wave power”, *Nature*, (*With corrigendum in Vol.257, p.626*), Vol. 256, pp. 478-479, 1975.
- [48] Guanche R. , Gómez V., Vidal C., Eguinoa I., “Numerical analysis and performance optimization of a submerged wave energy point absorber”, *Ocean Engineering, Elsevier*, Vol. 59, pp. 214-230, 2013.
- [49] Ruellan M., Ben Ahmed H., Multon B., Babarit A., Clément A.H., “Control influence on the electromagnetic generator pre-design for a wave energy converter”, *International Conference on Electrical Machines, Chania, Greece*, 2006.
- [50] Hals J., Falnes J., Moan T., “A comparison of selected strategies for adaptive control of wave energy converters”, *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, Vol. 133, No. 3, 2011.
- [51] French M.J., “A generalized view of resonant energy transfer”, *Journal of Mechanical Engineering Science*, Vol. 21, No. 4, pp. 299-300, March 1979.

-
- [52] Guenther D.A., Jones D., Brown D.G., “An investigative study of a wave-energy device”, *Energy*, Vol. 4, pp. 299-306, 1979.
- [53] Cretel J., “A Critical Assessment of Latching as Control Strategy for Wave-Energy Point Absorbers”, *Proceedings of the Twenty-first International Offshore and Polar Engineering Conference*, Maui, Hawaii, USA, 2011.
- [54] Perdigão J., Sarmiento A., “Overall-efficiency optimisation in OWC devices”, *Appl. Ocean Res.*, Vol. 25, pp. 157-166, 2003.
- [55] Ocean Power Technologies Website; <http://www.oceanpowertechnologies.com/spain.html>
- [56] Yang L., Hals J., Moan T., “Analysis of dynamic effects relevant for the wear damage in hydraulic machines for wave energy conversion”, *Ocean Engineering, Elsevier*, Vol. 37, No. 13, pp. 1089-1102, 2010.
- [57] Yavuz H., McCabe A., Aggidis G., Widden M. B. , “Calculation of the performance of resonant wave energy converters in real seas”, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, Vol. 220, pp. 117-128, September 2006.
- [58] Leijon M., Waters R., Rahm M., Svensson O., Bostrom C., Stromstedt E., et al., “Catch the wave to energy”, *IEEE Transactions on Power and Energy*, Vol. 7, No. 1, pp. 50-54, January-February 2009.
- [59] W. E. Cummins, “The impulse response function and ship motions”, *Schiffstechnik*, Vol. 9, pp. 101-109, 1962.
- [60] Yu Z., Falnes J., “State-space modelling of a vertical cylinder in heave”, *Elsevier Applied Ocean Research*, Vol. 17, No. 5, pp. 265 - 215, October 1995.

- [61] Polinder H., Gardner F., Vriesema B., “Linear PM generator for wave energy conversion in the AWS”, *IEEE Trans. on Energy Conversion*, Vol. 19, No. 3, pp. 583-589, September 2004.
- [62] Leijon M., Bernhoff H., Agren O., Isberg J., Sundberg J., Berg M., Karlsson K.E., Wolfbrandt A., “Multiphysics simulation of wave energy to electric energy conversion by permanent magnet linear generator”, *IEEE Trans. on Energy Conversion*, Vol. 20, No. 1, pp. 219-224, March 2005.
- [63] Trapanese M., “Un generatore lineare sincrono per los fruttamento dell’energia delle onde marine”, in Quaderni del Dipartimento di Ingegneria Elettrica dell’Università di Palermo, 1999.
- [64] Polinder H., Mecrow B.C., Jack A.G., Dickinson P.G., Mueller M.A., “Conventional and TFPM Linear Generators for Direct-Drive Wave Energy Conversion”, *IEEE Trans. on Energy Conversion*, Vol. 20, No. 2, pp. 260-267, June 2005.
- [65] Rodríguez Amenedo J.L., Burgos Díaz J.C., Arnalte Gómez S., “Sistemas eólicos de producción de energía eléctrica”, ed. Rueda S.L., June 2003.
- [66] Arof H., Wijono, Nor K.M., “Linear Generator: Design and Simulation”, *National Power Engineering Conf. (PECon).Proceedings.*, Bangi (Malaysia), pp. 306-311. December 2003.
- [67] Danielsson O., Eriksson M., Leijon M., “Study of a longitudinal flux permanent magnet linear generator for wave energy converters”, *International Journal Energy Research*, Vol. 30, pp. 1130-1145, May 2006.

- [68] Harris M.R., Pajooman G.H., Abu Sharkh S.M., “The problem of power factor in VRPM (transverse flux) machines”, *Proc. IEE Int Conf Elec Machines and Drives*, ed. Cambridge, pp. 386-390, September 1997.
- [69] Spooner E., Tavner P., Mueller M.A., Brooking P.R.M., Baker N.J., “Vernier hybrid machines for compact drive applications”, *Second International Conference on Power Electronics, Machines and Drives*, Vol. 1, p. 452, March-April 2004.
- [70] Krause P.C., Wasynczuk O., Sudhoff S.D., “Analysis of Electric Machinery and Drive Systems”, IEEE Press, 2002.
- [71] Wu F., Zhang X.P., Ju P., Sterling M.J.H., “Modelling and Control of AWS-Based Wave Energy Conversion System Integrated Into Power Grid”, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 23, No. 3, pp. 1196-1204, May 2008.
- [72] Boldea I., Nasar S.A., “Linear Electric Actuators and Generators”, Cambridge University Press, 1997.
- [73] Wu F., Ping X., Ju P., Sterling H., “Optimal Control for AWS-Based Wave Energy Conversion System”, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 24, No. 3, pp. 1747-1755, May 2009.
- [74] Molinas M., Skjervheim O., Andreasen P., Undeland T., Hals J., Moan T., Sørby B., “Power electronics as grid interface for actively controlled wave energy converters”, *Int. Conf. on Clean Electrical Power*, Capri, Italy, 2007.
- [75] Murray D.B., Egan M.G., Hayes J.G., O’Sullivan D.L., “Applications of supercapacitor energy storage for a wave energy converter system”, In Proc.

- 8th European Wave and Tidal Energy Conference, Uppsala, Sweden, pp. 786-795, 2009.
- [76] Giroux P., Sybille G., Le-Huy H., “Modelling and Simulation of a Distribution STATCOM using Simulink’s Power System Blockset”, *IECON’01 27th IEEE Industrial Electronics Society Annual Conference*, pp. 990-994, 2001.
- [77] Budal K., Falnes J., “Interacting point absorbers with controlled motion”, Count B, editor. *Power from sea waves*. London Academic Press, pp. 381 - 399, 1980.
- [78] Perdigão J.N.B.A., Sarmiento, A.J.N.A., “ A Phase Control Strategy for OWC Devices in Irregular Seas”, *The Fourth International Workshop on Water Waves and Floating Bodies*, J. Grue, editor, Department of Mathematics, University of Oslo, pp. 205 - 209, 1989.
- [79] Havelock TH., “Waves due to a floating sphere making periodic heaving oscillations”, *Proc. of the Royal Society*, Vol. 231, No. 1184, pp. 1-7, 1955.
- [80] Polinder H., Slootweg J.G., Compter J.C., Hoeijmakers M.J., “Modelling a linear PM motor including magnetic saturation”, *Int. Conf. on Power Electronics, Machines and Drives*, pp. 632-637, 2002.
- [81] Babarit A., Hals J., Muliawan M.J., Kurniawan A., Moan T., Krokstad J., “Numerical benchmarking study of a selection of wave energy converters”, *Renewable Energy, Elsevier*, Vol. 41, pp. 44-63, 2012.
- [82] Danielsson O., Leijon M., Sjostedt E., “Detailed study of the magnetic circuit in a longitudinal flux permanent-magnet synchronous linear generator”, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 41, No. 9, pp. 2490-2495, September 2005.

Apéndice A

Desarrollos matemáticos realizados durante la maximización de la potencia transferida al convertidor primario

Para calcular la energía máxima transferida al convertidor primario, debe maximizarse la expresión (6.15). En este apéndice, se detallan algunos pasos que acontecen durante el desarrollo de dicha maximización, considerando los parámetros de control r_{pto} y x_{pto} . Posteriormente, a partir de las expresiones obtenidas, se hallará una relación lineal entre ambos parámetros.

A.1. Derivada de la expresión respecto al parámetro de control r_{pto}

Para calcular la energía máxima transferida al convertidor primario, debe maximizarse la expresión (6.15),

$$E_c = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} |F_e(\omega)|^2 \frac{r_{pto}(\omega) - \delta |Z_{pto}(\omega)|^2}{|Z_{net}(\omega)|^2} d\omega \quad (\text{A.1})$$

**Desarrollos matemáticos realizados durante la maximización de la
Apéndice A potencia transferida al convertidor primario**

lo cual implica maximizar la expresión (7.1)

$$J_c = \frac{r_{pto}(\omega) - \delta |Z_{pto}(\omega)|^2}{|Z_{net}(\omega)|^2} \quad (A.2)$$

Por tanto, se desarrollará

$$\frac{\partial J_c}{\partial r_{pto}(\omega)} = 0 \quad (A.3)$$

En lo sucesivo, para facilitar la notación del desarrollo matemático, no siempre se indicará que los distintos parámetros dependen de la variable ω . Derivando, se llega a:

$$\frac{\partial J_c}{\partial r_{pto}} = \frac{\partial(\frac{1}{|Z_{net}|^2})}{\partial r_{pto}}(r_{pto} - \delta|Z_{pto}|^2) + \frac{1}{|Z_{net}|^2} \frac{\partial(r_{pto} - \delta|Z_{pto}|^2)}{\partial r_{pto}} \quad (A.4)$$

Por un lado, se tiene

$$\frac{\partial(\frac{1}{|Z_{net}|^2})}{\partial r_{pto}} = \left(\frac{-2|Z_{net}|}{|Z_{net}|^4}\right)\left(\frac{\partial|Z_{net}|}{\partial r_{pto}}\right) = \frac{-2}{|Z_{net}|^3}\left(\frac{\partial|Z_{net}|}{\partial r_{pto}}\right) \quad (A.5)$$

además, teniendo en cuenta (3.14), se tiene

$$\frac{\partial|Z_{net}|}{\partial r_{pto}} = \left(\frac{1}{2}\right)[(b+r_{pto})^2 + [\omega(m_{pto} + m_{add} + m) - \frac{k_s + k_{pto} + \rho g S}{\omega}]^2]^{-\frac{1}{2}} 2(b+r_{pto}) \quad (A.6)$$

$$\frac{\partial|Z_{net}|}{\partial r_{pto}} = \frac{b+r_{pto}}{|Z_{net}|} \quad (A.7)$$

Sustituyendo (A.7) en (A.5), se tiene

$$\frac{\partial(\frac{1}{|Z_{net}|^2})}{\partial r_{pto}} = \left(\frac{-2}{|Z_{net}|^3}\right)\left(\frac{b+r_{pto}}{|Z_{net}|}\right) = \frac{-2(b+r_{pto})}{|Z_{net}|^4} \quad (A.8)$$

Por otro lado,

$$\frac{\partial(r_{pto} - \delta|Z_{pto}|^2)}{\partial r_{pto}} = 1 - 2\delta|Z_{pto}|\frac{\partial|Z_{pto}|}{\partial r_{pto}} \quad (A.9)$$

A.2 Derivada de la expresión respecto al parámetro de control x_{pto}

Además, teniendo en cuenta (3.9), se tiene

$$\frac{\partial |Z_{pto}|}{\partial r_{pto}} = \left(\frac{1}{2}\right) [r_{pto}^2 + (\omega m_{pto} - \frac{k_{pto}}{\omega})^2]^{-\frac{1}{2}} (2r_{pto}) = \frac{r_{pto}}{\sqrt{r_{pto}^2 + (\omega m_{pto} - \frac{k_{pto}}{\omega})^2}} \quad (\text{A.10})$$

Por lo tanto (A.9) queda

$$\frac{\partial (r_{pto} - \delta |Z_{pto}|^2)}{\partial r_{pto}} = 1 - \frac{2\delta |Z_{pto}| r_{pto}}{\sqrt{r_{pto}^2 + (\omega m_{pto} - \frac{k_{pto}}{\omega})^2}} \quad (\text{A.11})$$

Sustituyendo ahora (A.11) y (A.8) en (A.4), se llega a

$$\frac{\partial J_c}{\partial r_{pto}} = \frac{-2(b + r_{pto})}{|Z_{net}|^4} (r_{pto} - \delta |Z_{pto}|^2) + \left(\frac{1}{|Z_{net}|^2}\right) \left(1 - \frac{2\delta |Z_{pto}| r_{pto}}{\sqrt{r_{pto}^2 + (\omega m_{pto} - \frac{k_{pto}}{\omega})^2}}\right) \quad (\text{A.12})$$

o bien,

$$\frac{\partial J_c}{\partial r_{pto}} = \frac{-2(b + r_{pto})}{|Z_{net}|^4} (r_{pto} - \delta |Z_{pto}|^2) + \left(\frac{1}{|Z_{net}|^2}\right)^2 \left(1 - \frac{2\delta |Z_{pto}| r_{pto}}{|Z_{pto}|}\right) \quad (\text{A.13})$$

teniendo en cuenta que la expresión (A.13) debe ser nula, y reagrupando, se llega a

$$(1 - 2\delta r_{pto}) |Z_{net}|^2 - 2(r_{pto} - \delta |Z_{pto}|^2)(b + r_{pto}) = 0 \quad (\text{A.14})$$

A.2. Derivada de la expresión respecto al parámetro de control x_{pto}

En este apartado, para maximizar la expresión (6.15), se desarrollará la expresión (7.3),

$$\frac{\partial J_c}{\partial x_{pto}(\omega)} = 0 \quad (\text{A.15})$$

del siguiente modo,

$$\frac{\partial J_c}{\partial x_{pto}} = \frac{\partial \left(\frac{1}{|Z_{net}|^2}\right)}{\partial x_{pto}} (r_{pto} - \delta |Z_{pto}|^2) + \left(\frac{1}{|Z_{net}|^2}\right) \frac{\partial (r_{pto} - \delta |Z_{pto}|^2)}{\partial x_{pto}} \quad (\text{A.16})$$

**Desarrollos matemáticos realizados durante la maximización de la
Apéndice A potencia transferida al convertidor primario**

por un lado, se tiene

$$\frac{\partial(\frac{1}{|Z_{net}|^2})}{\partial x_{pto}} = \frac{-2}{|Z_{net}|^3} \frac{\partial|Z_{net}|}{\partial x_{pto}} \quad (\text{A.17})$$

teniendo en cuenta (3.14), se tiene

$$\frac{\partial|Z_{net}|}{\partial x_{pto}} = \left(\frac{1}{2}\right)[(b+r_{pto})^2 + [\omega(m_{pto} + m_{add} + m) - \frac{k_s + k_{pto} + \rho g S}{\omega}]^2]^{-\frac{1}{2}} 2(x_i + x_{pto}) \quad (\text{A.18})$$

y simplificando

$$\frac{\partial|Z_{net}|}{\partial x_{pto}} = \frac{x_i + x_{pto}}{|Z_{net}|} \quad (\text{A.19})$$

por lo tanto, (A.17) puede expresarse como

$$\frac{\partial(\frac{1}{|Z_{net}|^2})}{\partial x_{pto}} = \frac{-2(x_{pto} + x_i)}{|Z_{net}|^4} \quad (\text{A.20})$$

por otro lado,

$$\frac{\partial(r_{pto} - \delta|Z_{pto}|^2)}{\partial x_{pto}} = -\delta \frac{\partial(|Z_{pto}|^2)}{\partial x_{pto}} = -2\delta|Z_{pto}| \frac{\partial|Z_{pto}|}{\partial x_{pto}} \quad (\text{A.21})$$

teniendo en cuenta que

$$\frac{\partial|Z_{pto}|}{\partial x_{pto}} = \left(\frac{1}{2}\right)[r_{pto}^2 + x_{pto}^2]^{-\frac{1}{2}}(2x_{pto}) = \frac{x_{pto}}{|Z_{pto}|} \quad (\text{A.22})$$

la ecuación (A.21) queda

$$\frac{\partial(r_{pto} - \delta|Z_{pto}|^2)}{\partial x_{pto}} = \frac{-2\delta|Z_{pto}|x_{pto}}{|Z_{pto}|} \quad (\text{A.23})$$

sustituyendo ahora (A.20) y (A.23) en (A.16), se tiene

$$\frac{\partial J_c}{\partial x_{pto}} = \left[\frac{-2(x_{pto} + x_i)}{|Z_{net}|^4}\right](r_{pto} - \delta|Z_{pto}|^2) + \left(\frac{1}{|Z_{net}|}\right)^2(-2\delta x_{pto}) \quad (\text{A.24})$$

teniendo en cuenta que la expresión (A.24) debe ser nula, y reagrupando, se llega a

$$(x_{pto} + x_i)(r_{pto} - \delta|Z_{pto}|^2) + |Z_{net}|^2 \delta x_{pto} = 0 \quad (\text{A.25})$$

A.3. Relación lineal entre los parámetros de control r_{pto} y x_{pto}

A continuación, se hallará una relación lineal entre los parámetros de control r_{pto} y x_{pto} con el fin de utilizarla en el proceso de maximización. Despejando $|Z_{net}|^2$ de las ecuaciones (A.14) y (A.25), se tiene

$$|Z_{net}|^2 = \frac{2(r_{pto} - \delta|Z_{pto}|^2)(b + r_{pto})}{1 - 2\delta r_{pto}} \quad (\text{A.26})$$

$$|Z_{net}|^2 = \frac{(x_{pto} + x_i)(\delta|Z_{pto}|^2 - r_{pto})}{\delta x_{pto}} \quad (\text{A.27})$$

igualando ahora las expresiones (A.26) y (A.27), se obtiene la relación

$$\frac{2(\delta|Z_{pto}|^2 - r_{pto})(b + r_{pto})}{1 - 2\delta r_{pto}} = \frac{(x_{pto} + x_i)(r_{pto} - \delta|Z_{pto}|^2)}{\delta x_{pto}} \quad (\text{A.28})$$

desarrollando ahora la expresión (A.28), se llega a

$$[1 + 2\delta b(\omega)]x_{pto}(\omega) - 2\delta r_{pto}(\omega)x_i(\omega) + x_i(\omega) = 0 \quad (\text{A.29})$$

quedando así establecida la relación lineal entre r_{pto} y x_{pto} .

