

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

Universidad de Burgos



**SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA
BASADO EN LA SUPERCONDUTIVIDAD PARA LA
ESTABILIZACIÓN DE MICROGRID POR
CONEXIÓN Y DESCONEXIÓN DE CARGAS,
SISTEMA SMES**

**ANEJO N° 4: SELECCIÓN DE ARQUITECTURAS DE
LOS CONVERTIDORES CA/CC Y CC/CC**

GRADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA

AUTOR:

RUBÉN ARCE DOMINGO

TUTOR:

CARMELO LOBO DE LA SERNA

JUNIO DE 2019



ANEJO 4: SELECCIÓN DE ARQUITECTURAS CONVERTIDOR CA/CC.	4
1. INTRODUCCIÓN A LOS CONVERTIDORES CA/CC:	4
2. POSIBLES CONVERTIDORES CA/CC:	4
2.1 Rectificadores bidireccionales monofásicos:	5
2.2 Rectificadores bidireccionales polifásicos	5
2.3 Rectificadores basados en tiristores:	6
2.4 Rectificadores como fuente de tensión:	7
2.4.1 Convertidor VSC de dos niveles	7
2.5 Rectificadores como fuente de corriente:.....	10
2.5.1 Convertidor de 6 pulsos CSC.....	11
2.5.2 Convertidor de 12 pulsos CSC.....	12
3. DIFERENCIAS ENTRE FUENTE DE CORRIENTE Y DE TENSIÓN	13
4. CONVERTIDOR CA/CC SELECCIONADO:.....	14
4.1 Selección del comportamiento	16
4.2 Selección de la topología	17
5. CONCLUSIÓN	17
5.1 Modo de carga.....	19
5.2 Modo de almacenamiento o modo stand-by.	20
5.3 Modo de descarga	20
6. BIBLIOGRAFÍA:	20

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES:

Ilustración 1: Esquema fuente de tensión típica.....	7
Ilustración 2: Convertidor como fuente de tensión de dos niveles	8
Ilustración 3: Intercambio de potencias convertidor como fuente de tensión.....	9
Ilustración 4: Convertidor como fuente de tensión de tres niveles	9
Ilustración 5:Esquema fuente de corriente típica	11
Ilustración 6: Convertidor como fuente de corriente	12



SISTEMA DE ESTABILIZACIÓN BASADO EN LA SUPERCONDUCTIVIDAD, SMES

Ilustración 7: Intercambio de potencias convertidor como fuente de corriente	13
Ilustración 8: Topología seleccionada del CA/CC	18
Ilustración 9: Convertidor CC/CC seleccionado	18
Ilustración 10: Modos de funcionamiento del CC/CC	19

ÍNDICE DE TABLAS:

Tabla 1: Clasificación genérica de convertidores CA/CC	4
Tabla 2: Clasificación convertidores bidireccionales	5
Tabla 3: Comparativa convertidores bidireccionales trifásicos	5
Tabla 4: Comparativa de convertidores en función del coste	15
Tabla 5: Comparativa de convertidores en función de sus prestaciones	16
Tabla 6: Solución adoptada de CA/CC	17

**ANEJO 4: SELECCIÓN DE ARQUITECTURAS CONVERTIDOR CA/CC.****1. INTRODUCCIÓN A LOS CONVERTIDORES CA/CC:**

Un convertidor CA/CC permite proporcionar energía eléctrica en forma de corriente continua a partir de una fuente de corriente alterna.

En este anejo se describirá en primer lugar el numeroso abanico de convertidores de corriente alterna a corriente continua, denominados rectificadores, que disponemos. Se hará un estudio comparado y se obtendrá la mejor opción para aplicarlo al sistema SMES.

En segundo lugar, se dará una descripción detallada del funcionamiento del mismo, así como se justificará el porqué de la elección de esa topología.

Puesto que el sistema SMES se empleará para estabilizar redes, el valor más importante que deberá tener su convertidor es la capacidad de transmitir potencia activa (P) y potencia reactiva (Q) dentro del sistema de distribución.

2. POSIBLES CONVERTIDORES CA/CC:

El mundo de los convertidores es muy amplio y existen numerosas topologías, la clasificación más sencilla sería entre rectificadores unidireccionales y bidireccionales.

Tabla 1: Clasificación genérica de convertidores CA/CC

Convertidores CA/CC	Unidireccionales
	Bidireccionales

Debemos en primer lugar descartar toda tipología de rectificadores unidireccionales puesto que dentro de un sistema SMES debemos ser capaces de cargar una bobina con la red y descargarla de nuevo en la línea de distribución trifásica.

Es decir, necesitamos que la energía pueda fluir desde el lado de la red hacia la bobina y de esta a la distribución, por ello no se estudiarán los convertidores CA/CC unidireccionales.

Dentro del número de fases distinguimos entre los que solo tienen una fase, monofásicos y los multifásicos.

*Tabla 2: Clasificación convertidores bidireccionales*

Convertidores CA/CC Bidireccionales	Monofásicos
	Polifásicos

2.1 Rectificadores bidireccionales monofásicos:

Debido a los rangos de potencias que son capaces de gestionar este tipo de rectificadores son demasiado bajos quedan descartados para su aplicación en un sistema SMES. Por lo tanto, nos centraremos en aquellos que si permiten grandes cantidades de energía.

2.2 Rectificadores bidireccionales polifásicos

Permiten trabajar con potencias mucho mayores de una forma más estable, dentro de ellos diferenciamos entre:

- Funcionamiento como fuente de tensión
- Funcionamiento como fuente de corriente
- Basados en tiristores

Tabla 3: Comparativa convertidores bidireccionales trifásicos

Convertidores CA/CC Bidireccionales Trifásicos	Comportamiento como fuente de Corriente (CSC)
	Comportamiento como fuente de Tensión (VSC)
	Basados en tiristores



2.3 Rectificadores basados en tiristores:

Los basados en tiristores tienen problemas de sincronización y provocan retrasos o “lag” en el factor de potencia de la red de distribución. Además de este hecho, inyectan en la red numerosos armónicos de bajas frecuencias que difícilmente pueden ser filtrados.

Empleando un convertidor de 12 pulsos conseguiremos reducir muchos indeseables armónicos, pero el THD o “Total Harmonic Distorsion” sigue siendo demasiado alto comparado con el estándar que dictamina la normativa.

Para evitar estos dos grandes inconvenientes se ha propuesto como solución el uso de convertidores basado en componentes autocontrolados como los GTO (Gate Turn Off) o los IGBT (Isulated Gate Bipolar Transistors). La aplicación de este tipo de transistores permite variar la cantidad de potencia activa y reactiva cedida a la carga, en nuestro caso, inductiva pura.

Dependiendo del campo de aplicación, la potencia del convertidor puede variar. Desde los kilovatios en las micro SMES para aplicaciones como SAI o fuentes ininterrumpidas, hasta los megavatios en aplicaciones de almacenamiento de energía como es nuestro caso.

Los IGBT's se quedan cortos en lo que respecta a trabajar con altas potencias, solo se emplean en pequeñas aplicaciones. Para el resto de las aplicaciones, contamos con los tiristores GTO que son la verdadera alternativa dentro de este rango de altas potencias.

El principal inconveniente con los GTO's son sus grandes pérdidas por conmutación, para evitar esto debemos reducir la frecuencia de conmutación hasta niveles de menos de 1-2kHz. Empleando un control con PWM conseguiremos minimizar la inyección de armónicos de corriente en la red.

La topología de rectificadores basados en tiristores se gobierna variando el ángulo α de disparo de puerta, esto supone un control muy sencillo. Si el ángulo es mayor que 90° el convertidor opera como un inversor y la bobina se descargaría.

Esta topología quedará descartada debido a que no permite intercambios significativos entre la potencia activa y reactiva.



2.4 Rectificadores como fuente de tensión:

La típica topología de convertidor como fuente de tensión es la ilustración 1:

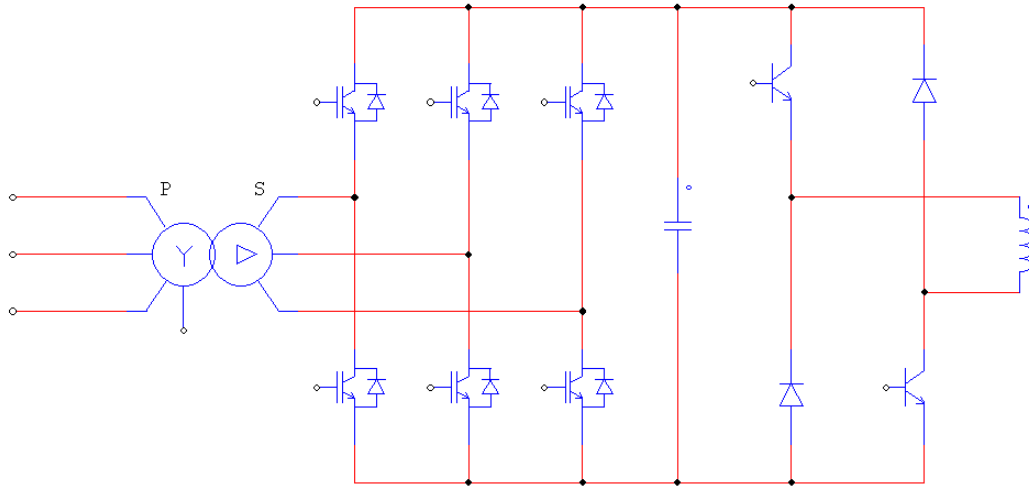


Ilustración 1: Esquema fuente de tensión típica (Mohd. Hasan Ali, J. T. (2008). SMES Strategy to Minimize Frequency Fluctuations of Wind Generator System)

Esta topología típicamente se caracteriza por:

- Existencia de un transformador a la entrada del convertidor
- Modulación PWM de un convertidor rectificador/inversor de 6 pulsos.
- Utilización de transistores IGBT y un chopper que trabaje en dos cuadrantes. Entre medias de los dos convertidores siempre se sitúa un condensador de unión.
- El control se basa en un algoritmo PI (*Proportional and Integral*).
- En el circuito chopper es controlado por PWM, cuando el ciclo de trabajo es mayor de 0.5 la bobina se cargará, pero cuando sea menor se descargará. Para realizar el algoritmo se suele hacer una modulación a base de onda triangular.
- Pueden ser de dos o de tres niveles de fuente de tensión.

2.4.1 Convertidor VSC de dos niveles

Es un convertidor que se comporta como una fuente de tensión y se denomina VSMES. Presenta una baja frecuencia de conmutación y es controlado por PWM senoidal/triangular. Está constituido por dos partes, como podemos apreciar en la ilustración 2.



SISTEMA DE ESTABILIZACIÓN BASADO EN LA SUPERCONDUCTIVIDAD, SMES

1. Una fuente de tensión que trabaja en los cuatro cuadrantes (VSC, Voltage Source Converter)
2. Convertidor CC/CC chopper que trabaja en dos cuadrantes

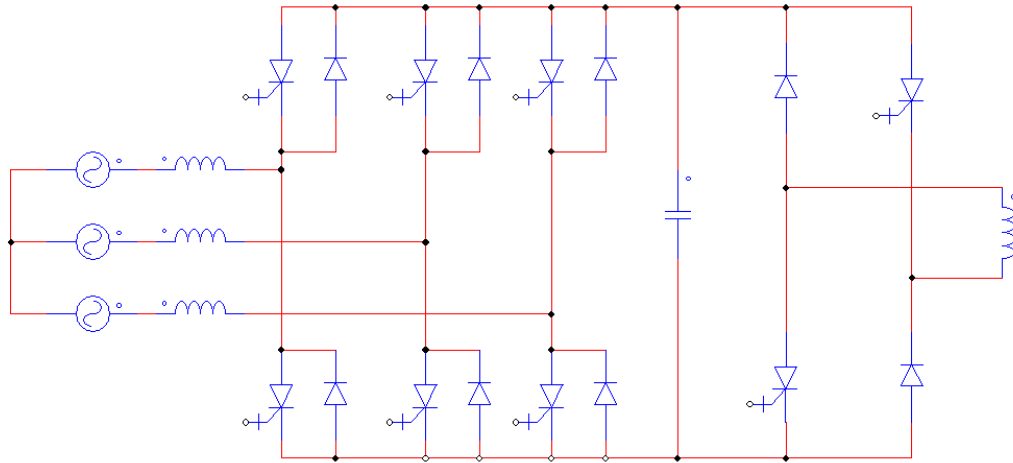


Ilustración 2: Convertidor como fuente de tensión de dos niveles (Chowdhury, D. S. (2007). Superconducting Magnetic Energy Storage System (SMES) for Improved Dynamic System Performance)

En esta topología de chooper, este se compone de dos GTO's y dos diodos. La bobina a base de superconductores se carga a través de la corriente del condensador.

Este convertidor presenta un análisis que engloba 6 pulsos de los GTO's para permitir la rectificación bidireccional, este hecho conlleva la necesidad de generar unos impulsos de disparo o drivers.

Los GTO's de la fuente de tensión constante permiten que con variaciones del ángulo de disparo y con la influencia de la modulación, las potencias tanto activa como reactiva puedan controlarse.

Se emplea modulación senoidal/triangular con una frecuencia que ha de ser baja para altas potencias, del orden de 1kHz. Con ello conseguimos que la inyección de armónicos sea tan solo de alta frecuencia, por lo que su eliminación será relativamente sencilla con un filtrado.

El condensador de nexo introduce una fuente estabilizada de tensión extra para el VSC, su tensión será la que permita cargar o descargar la bobina basada en superconductores. Esta capacidad es importante que permita una cooperación rápida y eficiente entre el convertidor bidireccional y el chopper.

**SISTEMA DE ESTABILIZACIÓN BASADO EN LA SUPERCONDUCTIVIDAD, SMES**

El comportamiento como fuente de tensión presenta el siguiente intercambio de potencias:

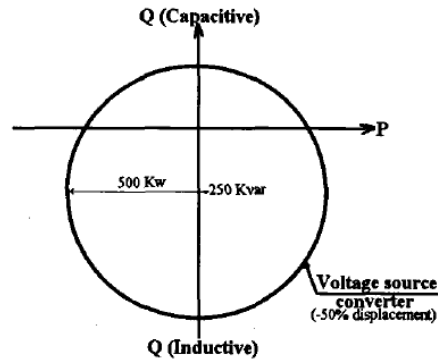


Ilustración 3: Intercambio de potencias convertidor como fuente de tensión (Tomoki Asao, R. T. (2008). Evaluation Method of Power Rating and Energy Capacity of Superconducting Magnetic Energy Storage System)

Vemos en la ilustración 3 cómo evolucionan la potencia activa y reactiva dentro de este convertidor y la cantidad de cada una de ellas que se puede poner en juego. Vemos como la Q es predominantemente inductiva, este hecho se ha de tener en cuenta para un correcto funcionamiento del convertidor.

2.4.2 Convertidor VSC de tres niveles

Su esquema típico de nuevo es el de la ilustración 4.

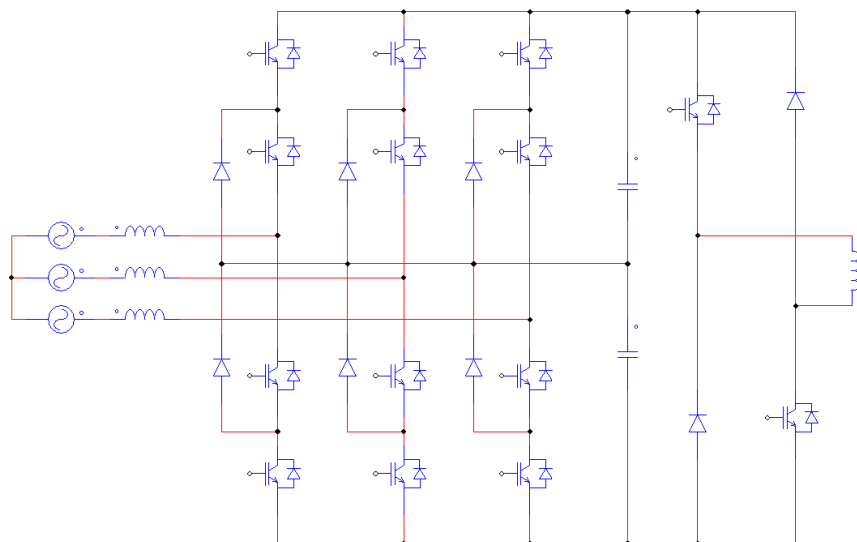


Ilustración 4: Convertidor como fuente de tensión de tres niveles (Embaiya Salih, S. L. (2014). Application of a superconducting magnetic energy storage unit for power systems stability improvement)



El convertidor CA/CC es un convertidor con tres niveles de punto neutro, NPC (*three-level Neutral Point Clamped*). Cada rama del convertidor está constituida por cuatro interruptores activos con cuatro diodos. En la práctica habitualmente se emplean IGBT's o IGCT's como interruptores.

En el lado de corriente continua el condensador de unión se encuentra partido en dos, lo que aporta un punto neutro (NP, *Neutral Point*). Los diodos conectados a este punto NP son diodos de sujeción, también llamados *clamping diodes*.

Los convertidores como fuente de tensión de tres niveles presentar ventajas frente a los de dos niveles:

- Todos los componentes de los convertidores de dos niveles soportarán la mitad de tensión durante la conmutación que en el caso de tres niveles.
- Para los mismos rangos de tensión y la misma frecuencia de conmutación menor THD y dv/dt , es decir, menor inyección de armónicos y menores gradientes de tensión en comparación con el de dos niveles.
- Pero el mayor inconveniente es el elevado número de componentes que tiene que emplear, además de su complejísimo control a base de PWM.
- Otro inconveniente es que debido a la carga y descarga de los dos condensadores se pueden producir fluctuaciones en la frecuencia de salida a la línea de distribución.

2.5 Rectificadores como fuente de corriente:

La típica topología de convertidor como fuente de corriente se encuentra en la ilustración 5:

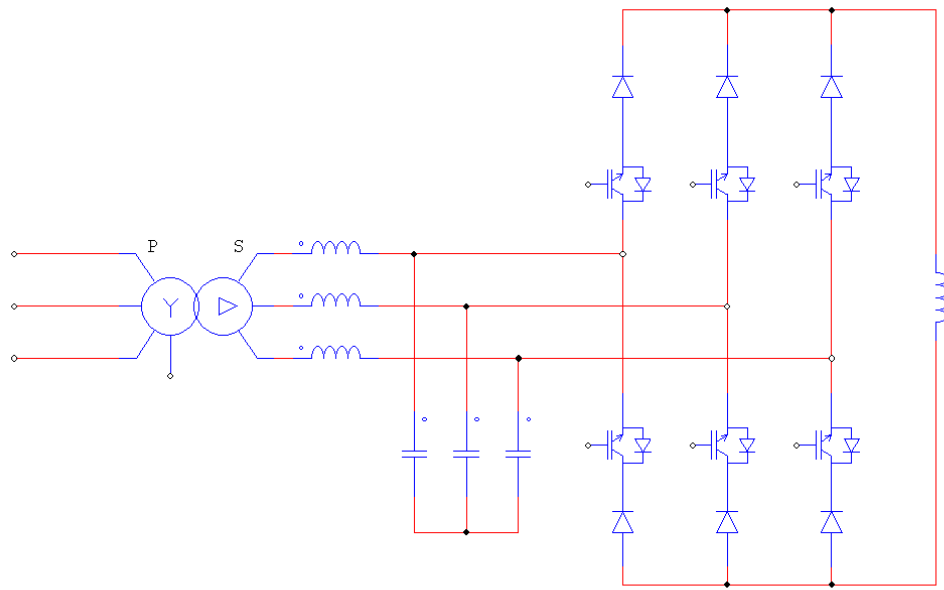


Ilustración 5: Esquema fuente de corriente típica (Sayed M. Said, M. M.-A. (2014). Application of Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES) for Voltage Sag/Swell Supression)

Esta topología típicamente se caracteriza por:

- Existencia de un transformador a la entrada del convertidor
- La batería de condensadores dispuestos a la entrada es empleada como buffer de almacenamiento de energía inductiva para permitir intercambiar potencia reactiva con la inductancia de la línea. Estos condensadores también permiten filtrar los armónicos de la corriente de altas frecuencias.
- Su control suele realizarse a través de una señal PWM trifásica para controlar la corriente inyectada.
- Permite topologías de 6 o 12 pulsos de corriente, el de seis pulsos permite menor tensión de rizado en el lado de corriente continua, lo que se traduce en menores pérdidas debidas a la componente alterna dentro de la bobina.
- El control se basa en un algoritmo PI (*Proportional and Integral*).

2.5.1 Convertidor de 6 pulsos CSC

Suelen estar basados en GTO's y realizan la conmutación de la corriente por la bobina cada set de 120°. Empleando un control PWM apropiado los armónicos inyectados de corriente serán mínimos.



En este tipo de convertidores es necesaria una batería de condensadores que sirvan de almacén y como compensación a la gran inductancia de la carga. Su frecuencia de trabajo de baja, del orden de 500Hz.

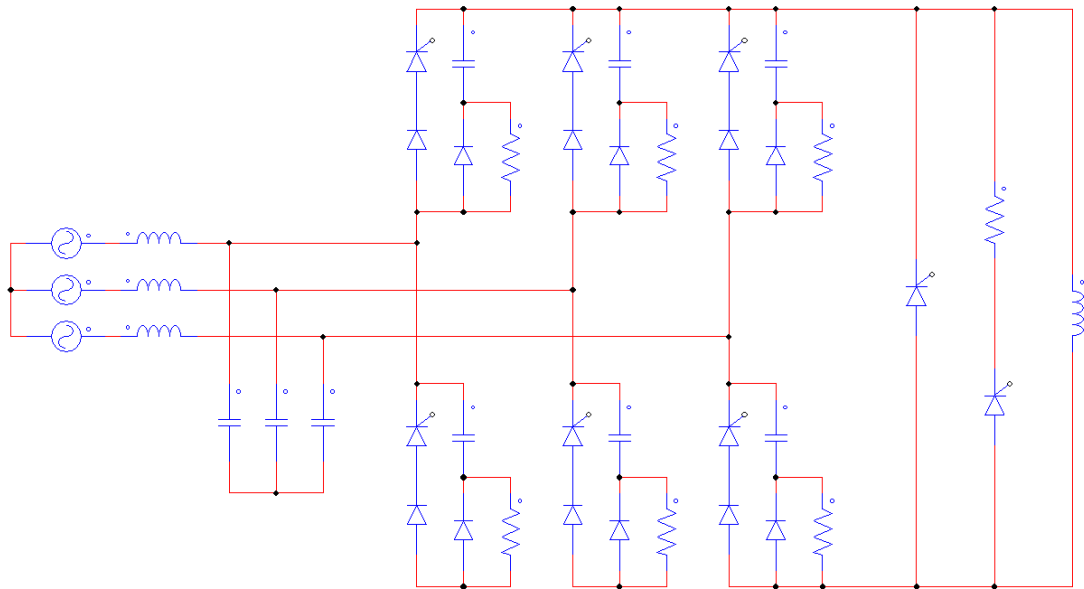


Ilustración 6: Convertidor como fuente de corriente (Tomoki Asao, R. T. (2008). Evaluation Method of Power Rating and Energy Capacity of Superconducting Magnetic Energy Storage System)

Como vemos en la topología de la ilustración 6 existe un circuito resonante que consiste en la inductancia de la línea y los condensadores de entrada. Para evitar problemas de resonancia, la frecuencia a la que esta se produce debe fijarse a un valor conocido.

El valor que se suele fijar es el 9º armónico, donde el intervalo entre la frecuencia de resonancia y la frecuencia de los armónicos del control PWM puedan estar bien diferenciadas.

2.5.2 Convertidor de 12 pulsos CSC

El comportamiento como fuente de corriente permite almacenar más capacidad que inductancia, esto es una ventaja para la compensación de las redes. Se emplea en el rango de grandes potencias.

Su principal característica es la gran facilidad que tiene de variar el factor Q/P dentro de la rectificación de la energía de la red.

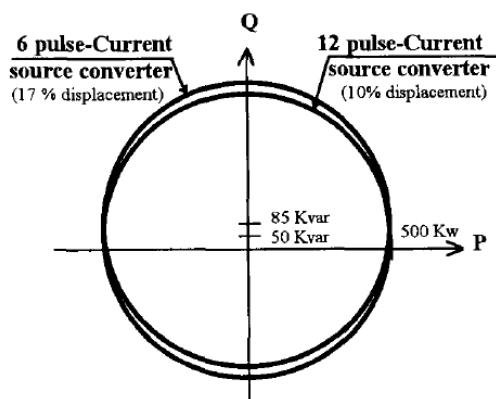


Ilustración 7: Intercambio de potencias convertidor como fuente de corriente (Tomoki Asao, R. T. (2008). Evaluation Method of Power Rating and Energy Capacity of Superconducting Magnetic Energy Storage System)

Podemos ver en la ilustración 7 como es el intercambio de potencia activa y reactiva dentro del convertidor. La diferencia con respecto a la topología con comportamiento como fuente de tensión es que esta permite potencia reactiva inductiva y capacitiva a partes iguales.

También apreciamos la pequeña diferencia entre un convertidor de 6 y de 12 pulsos en lo que respecta al factor P/Q .

3. DIFERENCIAS ENTRE FUENTE DE CORRIENTE Y DE TENSIÓN

1. Ambas topologías permiten la independencia del control de la potencia activa y reactiva fluctuando entre la inductancia superconductora y el sistema de potencia con la red de distribución. Sin embargo, la fuente de corriente permite aportar mayores niveles de potencia reactiva capacitiva.
2. El rizado en la topología como fuente de tensión es menor que con la topología de corriente, en especial en la topología de 12 pulsos. Esto implica la reducción de las pérdidas en el bobinado del superconductor.
3. En ambas topologías se utiliza una baja frecuencia de conmutación en el sistema de control, lo cual es apropiado para altas potencias. El empleo de IGBT's es posible solamente en pequeños sistemas SMES, por lo tanto, estos quedan eliminados para posibles aplicaciones de electrónica de alta potencia.
4. Con ambas tipologías podemos obtener una baja distorsión (THD).



SISTEMA DE ESTABILIZACIÓN BASADO EN LA SUPERCONDUCTIVIDAD, SMES

5. Las dos permiten comportamientos similares cuando trabajamos con fuentes de alimentación ininterrumpida.
6. La tipología de 6 pulsos de fuente de corriente no es apropiada para un tiempo mínimo de pulso en los GTO's menores de 60/70 us, sino el THD será inaceptable. En estos casos el convertidor de 12 pulsos como fuente de corriente será mejor alternativa.
7. Para altísimas potencias en los sistemas SMES la mejor opción será emplear varios modos de topologías de convertidores como fuentes de corriente. La estrategia de control será de PWM o SPWM.

4. CONVERTIDOR CA/CC SELECCIONADO:

Una vez desarrollados todos los posibles convertidores bidireccionales que cumplen las características se procederá a buscar aquel que cumpla mejor dos criterios:

1. Coste
2. Prestaciones

En la tabla 4 podemos ver una comparativa entre las principales características a tener en cuenta a la hora de seleccionar la topología de un sistema SMES en los que respecta al coste:

**SISTEMA DE ESTABILIZACIÓN BASADO EN LA SUPERCONDUCTIVIDAD, SMES***Tabla 4: Comparativa de convertidores en función del coste*

Criterio	Basados en tiristores	Fuente de tensión		Fuente de corriente	
		2 niveles	3 niveles	6 pulsos	12 pulsos
Número de componentes	14/16	12	18	14	26
Número de componentes del chopper	4	4	4	0	0
Pérdidas de conmutación	Muy altas	Altas		Media	
Filtro en el lado de CA	SI	NO		SI	
Filtro a la salida de CC	SI	SI		NO	
Necesidad de convertidor CC/CC	SI	SI		NO	

En la tabla 5 podemos ver una comparativa entre las principales características a tener en cuenta a la hora de seleccionar la topología de un sistema SMES en los que respecta a sus prestaciones:

**SISTEMA DE ESTABILIZACIÓN BASADO EN LA SUPERCONDUCTIVIDAD, SMES**

Tabla 5: Comparativa de convertidores en función de sus prestaciones

Criterio	Basados en tiristores	Fuente de tensión		Fuente de corriente	
		2 niveles	3 niveles	6 pulsos	12 pulsos
Niveles de potencia	Bajos	Alto	Muy alto	Medio	Alto
Control de potencia activa y reactiva P/Q	Permiten control de potencia activa pero muy poca capacidad de modificar la potencia reactiva.	Permite control independiente de potencia activa y reactiva. No depende de la bobina SMES.		Permite control independiente de potencia activa y reactiva. Permite gran potencia reactiva capacitiva. Depende de la bobina SMES	
THD (Total Harmonic Distorsion)	Muy alto	Bajo		Bajo	
Rizado en la tensión de la bobina	Existe rizado	Existe rizado, se soluciona con filtro		Apenas rizado, en especial en la tipología de 12 pulsos.	
Complejidad del control	Ninguna	Media	Alta	Baja	Media

4.1 Selección del comportamiento

Finalmente, y tras evaluar varias todas las opciones, se optarán por un rectificador bidireccional que se comporta como **fuentes de tensión**, esto es debido a que:

1. Permite un control independiente de las potencias reactiva y activa, Q y P.
2. Tiene un comportamiento que es independiente de la bobina SMES que coloquemos.
3. Presenta una distorsión armónica o THD similar al convertidor como fuente de corriente y además permite potencias mayores.



SISTEMA DE ESTABILIZACIÓN BASADO EN LA SUPERCONDUCTIVIDAD, SMES

4. Otra diferencia es que a pesar de que el control es más complejo que en el caso de la fuente de corriente, necesita bastantes menos elementos, y en consecuencia:
5. Es más económico de implementar.

4.2 Selección de la topología

Existen dos opciones principales, la topología de 2 niveles y la de 3 niveles. Las diferencias entre ambas se han descrito con anterioridad en este Anejo III, por ello se ha optado por la **topología de 2 niveles**.

De igual manera las razones que justifican la solución adoptada son:

1. En lo que respecta al sistema de control, un convertidor de tres niveles requiere un algoritmo de control mucho más complejo que uno de dos niveles.
2. Motivos económicos: El mayor número de componentes, así como las pérdidas asociadas a cada uno de ellos ha llevado a adoptar la topología de dos niveles.

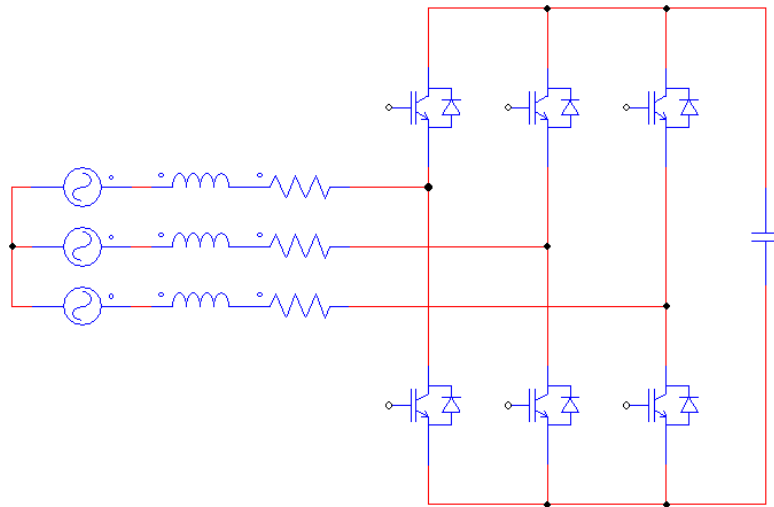
5. CONCLUSIÓN

En vista a todas las posibles alternativas y en función de la tabla se ha optado por una topología de convertidor bidireccional que se comporta como fuente de tensión (VSC) en dos niveles:

Tabla 6: Solución adoptada de CA/CC

Solución adoptada de convertidor CA/CC	VSC de 2 niveles
---	------------------

En la ilustración 8 vemos la opción seleccionada para nuestro sistema SMES:



*Ilustración 8: Topología seleccionada del CA/CC (Mohd. Hasan Ali, J. T. (2008).
SMES Strategy to Minimize Frequency Fluctuations of Wind Generator System)*

Vemos que presenta la topología de rectificador de doble onda y que por tanto tiene 6 diodos que permiten rectificar la tensión procedente de la red trifásica.

A la entrada de la red se dispone de un filtro puesto que no se debe conectar nunca un rectificador directamente a la línea de distribución. Vemos también a la salida de este un condensador que sirve de unión entre el convertidor CA/CC con el chopper.

En lo que respecta a la topología para el convertidor CC/CC se ha escogido aquella más empleada en este tipo de aplicaciones:

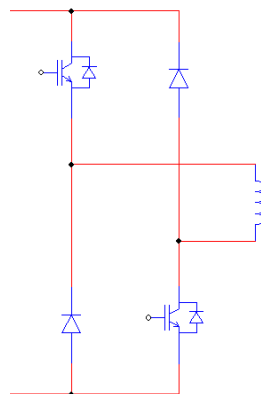


Ilustración 9: Convertidor CC/CC seleccionado (recorte de la anterior)



Las ventajas de esta topología frente a sus pocas alternativas son:

- Sencillez de control
- Reducido número de componentes (tan solo 2 diodos y 2 IGBT's)
- Permite potencias elevadas.

En la ilustración 10 vemos cual es el comportamiento de este circuito chopper dentro de un sistema SMES, sus modos de funcionamiento son:

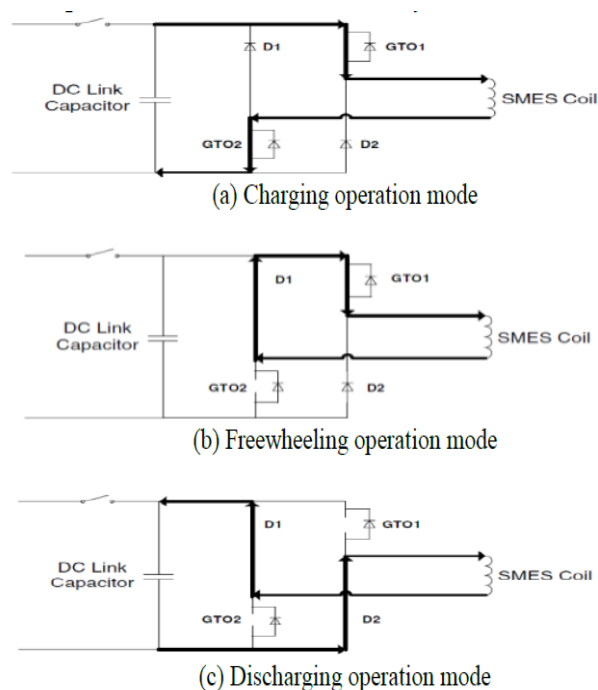


Ilustración 10: Modos de funcionamiento del CC/CC (Mohd. Hasan Ali, S. M.-K. (2009). Improvement of Wind-Generator Stability by Fuzzy-Logic-Controlled SMES. IEEE)

5.1 Modo de carga

El condensador que vemos en la imagen hace las veces de fuente y permite inyectar corriente en la bobina cuando aplicamos tensión en la puerta de los dos IGBTs.



5.2 Modo de almacenamiento o modo stand-by.

El almacenamiento se basa en cortocircuitar la bobina consigo misma de tal forma que la corriente no escape ni se disipe en forma de calor. Para producir esto debemos aplicar tensión en la puerta de un transistor y por lo tanto el circuito se cerrará por uno de los dos diodos.

5.3 Modo de descarga

Si por el contrario lo que queremos es descargar la bobina de vuelta a la red, debemos dejar de aplicar tensión a la puerta de los IGBTs y por tanto esta corriente almacenada fluirá por los diodos hacia el convertido CA/CC que funciona en modo de inversor por ser bidireccional.

En anejo 5 se realizará algoritmo de control de los elementos asociados a esta topología.

6. BIBLIOGRAFÍA:

- [1] Agus Purwadi, N. S. (2013). Modelling and Analysis of Electric Vehicle DC Fast Charging Infrastructure Based on PSIM. *First International Conference on Artificial Intelligence, Modelling & Simulation*.
- [2] Chowdhury, D. S. (2007). *Superconducting Magnetic Energy Storage System (SMES) for Improved Dynamic System Performance*.
- [3] Embaiya Salih, S. L. (2014). *Application of a superconducting magnetic energy storage unit for power systems stability improvement*.
- [4] Jing Shi, A. Z. (2015). Voltage Distribution Characteristic of HTS SMES. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 1-6.
- [5] Jing Shi, Y. T. (2005). Study on Control Method of Voltage Source Power Conditioning System for SMES. *IEEE/PES Transmission and Distribution*. China.
- [6] Mohd. Hasan Ali, B. W. (2010). An Overview of SMES Applications in Power and Energy Systems. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 1(1), 38-47.
- [7] Mohd. Hasan Ali, J. T. (2008). *SMES Strategy to Minimize Frequency Fluctuations of Wind Generator System*.



SISTEMA DE ESTABILIZACIÓN BASADO EN LA SUPERCONDUCTIVIDAD, SMES

- [8] Mohd. Hasan Ali, S. M.-K. (2009). Improvement of Wind-Generator Stability by Fuzzy-Logic-Controlled SMES. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 45(3), 1045-1051.
- [9] Sayed M. Said, M. M.-A. (2014). *Application of Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES) for Voltage Sag/Swell Supression in Distribution System with Wind Power Penetration.*
- [10] Tomoki Asao, R. T. (2008). *Evaluation Method of Power Rating and Energy Capacity of Superconducting Magnetic Energy Storage System for Output Smoothing Control of Wind Farm.*
- [11] Zaxiang Nie, X. X. (2013). SMES-Battery Energy Storage System for Conditioning Outputs From Direct Drive Linear Wave Energy Converters. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 23(3).