

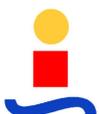


DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL PREDICTIVO PARA EL ACCIONAMIENTO DE LA MÁQUINA DE RELUCTANCIA CONMUTADA DE UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO CINÉTICO PARA LA MEJORA DE LA EFICIENCIA EN LA EDIFICACIÓN

Autor: JAVIER VILLEGAS NÚÑEZ

Tutor: SERGIO VÁZQUEZ PÉREZ

CAPÍTULO 3. SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO CINÉTICOS DE ENERGÍA





1. INTRODUCCIÓN

En el punto 4 del capítulo 2 se realizó una introducción a estos sistemas. En este capítulo se va a realizar un estudio más técnico y más profundo de esta tecnología.

Estos almacenadores acumulan energía mecánica en forma de energía cinética en una masa rodante denominada volante de inercia. Cuando se quiere recuperar la energía almacenada en el volante, una máquina funcionando como generador se encarga de convertir dicha energía mecánica en energía eléctrica. La conversión energética inversa, destinada a cargar el acumulador, se realiza mediante el accionamiento de un motor. Lo habitual es que el volante se incorpore al motor-generador eléctrico configurando una máquina aislada, conectada al exterior a través de cables al igual que en una batería electroquímica. Se trata pues de lo que podríamos denominar “baterías mecánicas recargables”.

2. ELEMENTOS CONSTITUTIVOS

Físicamente, un sistema de almacenamiento cinético basado en volantes de inercia (FESS en sus siglas en inglés: Flywheel energy storage systems) está compuesto por cuatro elementos básicos, como puede verse en la Figura 3.1: el volante de inercia (1), la máquina eléctrica (2), los convertidores electrónicos de potencia (3) y el sistema de control (4).

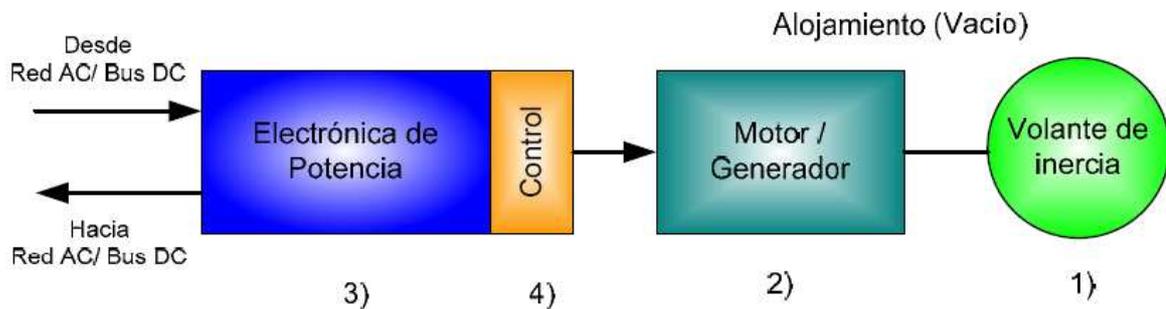


Figura 3.1. Esquema simplificado de un sistema de almacenamiento cinético de energía

- El volante de inercia

Es el elemento central del almacenador, donde se acumula propiamente la energía. La energía cinética almacenada en un disco rodante depende de su momento de inercia “ I ” y de la velocidad de rotación “ ω ” según la siguiente expresión:

$$E_c = \frac{1}{2} I \cdot \omega^2$$

- La máquina eléctrica

Un motor/generador convierte la energía eléctrica en energía cinética y viceversa, según actúe acelerando o frenando el volante respectivamente. Estas dos funcionalidades pueden ser llevadas a cabo por dos máquinas independientes, sin embargo motor y generador habitualmente se combinan en una misma máquina eléctrica con el fin de reducir peso, coste y complejidad al sistema.

La máquina utilizada debe ciertos requerimientos básicos para formar parte de un sistema de almacenamiento cinético:

- Tener capacidad para producir alta potencia de salida
- Responder rápidamente frente a cambios en la demanda de potencia
- Ser capaz de soportar altas velocidades de rotación

	DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL PREDICTIVO PARA EL ACCIONAMIENTO DE LA MÁQUINA DE RELUCTANCIA CONMUTADA DE UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO CINÉTICO PARA LA MEJORA DE LA EFICIENCIA EN LA EDIFICACIÓN
	Autor: JAVIER VILLEGAS NÚÑEZ
	Tutor: SERGIO VÁZQUEZ PÉREZ

- Presentar alta fiabilidad

Los puntos anteriores reducen el abanico de posibilidades a dos tipos de motores: las máquinas de reluctancia y las de imanes permanentes.

- Los convertidores electrónicos de potencia

Los convertidores electrónicos de potencia constituyen el accionamiento eléctrico de la máquina. Se trata de un equipo de regulación que gestiona el flujo de energía con el exterior. Su labor consistirá por un lado en extraer potencia de la entrada para acelerar el volante durante la carga y, por otro, en volcar la potencia producida por la desaceleración de la máquina durante la descarga.

Mientras que la energía almacenada en el módulo está determinada por la velocidad, la masa y la geometría del volante de inercia, los límites de la potencia de entrada y de salida están generalmente limitados por la electrónica de potencia.

- El sistema de control

Se trata básicamente de una electrónica de control que se ocupa de responder en tiempo real a las necesidades del sistema, esto es, atender a la demanda/aporte de potencia a la entrada del almacenador respondiendo mediante la regulación de la velocidad del volante de la máquina y monitorizando respuesta y entrada en un lazo cerrado de control.

El sistema de control del almacenador deberá resolver cuándo hacer funcionar la máquina en modo motor y cuándo hacerlo en modo generador en función de la velocidad del volante y de la estrategia de control global.



3. CLASIFICACIÓN

El factor clave que determina que tecnología usar en cada una de las partes que componen el FESS, es la máxima velocidad de giro del volante de inercia. Dependiendo de esta velocidad, el FESS puede ser clasificado como de baja velocidad o de alta velocidad [20], estando el límite entre ambos sistemas alrededor de las 10000 rpm.

La velocidad máxima de giro viene condicionada principalmente por el material del que está hecho el volante. Normalmente los sistemas FESS de baja velocidad tienen un volante de inercia de acero ya que estos no pueden alcanzar velocidades muy altas, mientras que los de alta velocidad tienen un volante de fibra de carbono. La velocidad también está condicionada en menor grado por la geometría y la longitud del volante de inercia, por el tipo de máquina eléctrica y el tipo de soporte **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**[24].

Aunque los requerimientos tecnológicos de los sistemas a altas velocidades son más complejos, permiten almacenar mucha más energía que el mismo sistema a bajas velocidades ya que la energía almacenada depende del cuadrado de la velocidad de giro. Además hay que tener en cuenta otras consideraciones en el desarrollo de FESS, como es el rendimiento, la seguridad y la fiabilidad de estos sistemas [25][26][27].

4. CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES

Los sistemas de almacenamiento cinéticos de energía basados en volantes de inercia están caracterizados por ser capaces de proporcionar grandes picos de potencia. Los FESS tienen una alta densidad de potencia y tiene una durabilidad

	DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL PREDICTIVO PARA EL ACCIONAMIENTO DE LA MÁQUINA DE RELUCTANCIA CONMUTADA DE UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO CINÉTICO PARA LA MEJORA DE LA EFICIENCIA EN LA EDIFICACIÓN
	Autor: JAVIER VILLEGAS NÚÑEZ
	Tutor: SERGIO VÁZQUEZ PÉREZ

“infinita” en número de ciclo de trabajo, así que su principal aplicación es en sistemas que implican un gran número de ciclos de carga y descarga, como en el transporte y en la calidad de potencia.

Un volante de inercia es capaz de almacenar grandes cantidades de energía y rangos de potencia desde kilovatios a megavatios. La rápida respuesta en los volantes de inercia los hacen útiles para multitud de aplicaciones. Otras características importantes de estos sistemas ya mencionadas en el apartado 4.1.1 del capítulo 2, son:

- Alta densidad de potencia: 30 – 600 W/kg
- Alta densidad de energía: 5 – 80 Wh/Kg
- Rangos de potencia: 50 kW – 4 MW
- Rangos de energía: 100 kWh – 100 MWh
- Tiempos de descargas posibles menores de 5 minutos
- Tiempo de vida casi independiente de ciclos de carga/descarga
- Fácil medida de la carga mediante la velocidad de rotación
- No se requiere un mantenimiento
- Tiempo de recarga cortos
- Bajo impacto medioambiental de sus materiales constructivos.



5. FACTORES RELEVANTES EN ALMACENADORES CINÉTICOS

5.1. Energía almacenada

La cantidad de energía almacenada (E_c) es proporcional a la masa del volante de inercia y al cuadrado de su velocidad angular, se calcula a través de la siguiente ecuación:

$$E_c = \frac{1}{2} I \cdot \omega^2$$

Donde I es el momento de inercia y ω la velocidad angular.

5.1.1 Limitación de la velocidad

La máxima velocidad de giro de un volante de inercia, y por lo tanto, la máxima energía que puede ser almacenada está limitada por las tensiones mecánicas que se producen en el interior del volante de inercia provocadas por la fuerza centrífuga.

Por tanto, la máxima energía almacenada está limitada por el límite elástico del material con el que está hecho el volante de inercia. La máxima densidad de energía específica (por unidad de masa) E_{sp} que puede ser almacenada en un volante de inercia es:

$$E_{sp} = K_s \frac{\sigma_m}{\rho}$$

Donde σ_m es el límite elástico del material, ρ la densidad del material del volante de inercia, y K_s es un factor de forma.



Geometría del volante de inercia	Sección	Factor de forma K
Disco		1
Disco modificado		0,931
Disco cónico		0,806
Disco plano no perforado		0,606
Cilindro delgado		0,5
Barra conformada		0,5
Montura con membrana		0,4
Barra simple		0,333
Barra plana perforada		0,305

Tabla 3.1. Factor de forma para diferentes geometrías del volante de inercia [18].

La dependencia de E_{sp} de las propiedades del material muestra que se debe utilizar un material el cual tenga una alta resistencia a tracción y baja densidad. Por esa razón, los compuestos de fibra son los materiales más recomendables para los FESS.

Rotor material	σ_m (GPa)	ρ (kg/m ³)	E_{sp} (Wh/kg)
E-glass	3.5	2540	190
S-glass	4.8	2520	265
Kevlar	3.8	1450	370
Spectra 1000	3.0	970	430
T-700 graphite	7.0	1780	545

Tabla 3.2. Parámetros físicos de fibras comerciales

Así, los volantes de inercia de alta resistencia y altas velocidades no están hechos de acero sino de compuestos de fibra reforzados. Además estos son más seguros si la velocidad máxima es superada, ya que tienden a desintegrarse a través del radio exterior en lugar de desprender material a alta velocidad. Ya que al hacer rotores de compuestos de fibra reforzada con fibras orientadas circularmente, en el volante es



más probable que en caso de una grieta, ésta se desarrolle en forma circunferencial, siendo mucho menos propensos a que se desprenda fragmentos del volante en el caso de un fallo catastrófico.

5.1.2 Limitación de la inercia

La inercia del volante depende de su forma geométrica y de las propiedades del material en el que está construido. Para rotores de fibra de carbono la forma dominante es un cilindro hueco donde los efectos de las tensiones son minimizados, y cuyo momento de inercia viene dado por:

$$I = \frac{1}{4}m(r_o^2 + r_i^2) = \frac{1}{4} \pi a \rho (r_o^4 - r_i^4)$$

Donde ' r_o ' es el radio exterior, ' r_i ' es el radio interior, ' a ' es la longitud del cilindro, ' m ' representa la masa del cilindro y ' ρ ' es la densidad del material del cilindro. De la fórmula se desprende que a mayores dimensiones del volante mayor es la inercia, pero las interacciones de tensión limitaran las dimensiones prácticas posibles.

5.2. Material.

Hay dos tipos de volantes en función del material con el que están hechos:

Los que están hechos de un material compuesto avanzado, tal como fibra de carbono o grafito. Estos materiales tienen una gran relación resistencia/peso, lo cual dota al volante de inercia de tener una alta densidad de energía.

Los de acero como material principal. Esta clase sólo es utilizada en diseños tradicionales con grandes diámetros, bajas velocidades de rotación y baja densidad de energía y potencia.

5.3. Geometría de los volantes de inercia.

La geometría de un FESS es generalmente elegida de forma que se maximice la densidad de energía. Dado que la geometría influye en el momento de inercia del volante, para aumentar la energía almacenada hay que colocar la masa lo más lejos posible del eje de rotación maximizando su inercia. Pero también hay que tener en cuenta que la energía específica E_{sp} depende de un factor de forma que es una medida de la eficiencia en la forma del volante. Este factor de forma introducido anteriormente, posee diferentes valores según la sección geométrica del volante.

Geometría del volante de inercia	Sección	Factor de forma K
Disco plano no perforado		0,61
Cilindro de pared delgada		0,5
Cilindro con membrán		0,4
Cilindro de pared gruesa		0,31

Tabla 3.3. Factores de forma para varias geometrías de volantes de inercia [18].

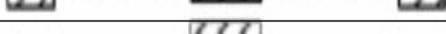
Geometría del volante de inercia	Sección	Energía específica
Cilindro de pared delgada		 Peor
Cilindro con membrán		
Disco plano no perforado		
Cilindro de pared gruesa		

Tabla 3.4. Clasificación de varias geometrías de volantes de inercia en función de la energía específica [18].

Se observa en las tablas anteriores que un volante con forma de cilindro de pared delgada tiene la energía específica más alta, debido a que maximiza el momento de inercia del volante y por tanto la energía almacenada.



Otro factor importante en la geometría, es la rigidez del sistema. Conocida ya la sección óptima del volante, hay que elegir la longitud del éste, la cual esta directamente relacionada con consideraciones dinámicas. Así, si el sistema de rodamientos es muy duro (alta rigidez), el volante deberá soportar modos de resonancia cercanos a la frecuencia de operación del motor (velocidades altas cercanas a la nominal), lo cual es desaconsejable ya que supone grandes pérdidas. Por tanto, el sistema debe ser dimensionado con unos rodamientos suficientemente suaves (reducir la rigidez, k) y así garantizar que estos modos críticos sucedan a bajas velocidades, en lo que este fenómeno es menos crítico.

$$\omega_{\text{nat}} = \sqrt{k/m}$$

5.4. Los rodamientos

El volante se apoya en su funcionamiento en unos rodamientos, lo cual traerá consigo unas pérdidas debidas a la fricción mecánica. Para evitar esto, en los FESS se suele usar rodamientos magnéticos, estos equipos se componen de imanes permanentes que se encargan de soportar el peso del volante a través de fuerzas de repulsión, de manera que el rozamiento con el volante es muy pequeño quedando éste en un estado de flotación sobre los rodamientos.

5.5. Pérdidas de energía

Uno de los parámetros más importantes de los FESS es la eficiencia energética, la cual depende mucho de las pérdidas del sistema.

El volante debe superar continuamente sus perdidas mecánicas. Tanto las debidas al rozamiento con los rodamientos que los sostienen, como las debidas a la fricción con el aire.



Para reducir estas pérdidas los volantes de inercia son generalmente montados en una carcasa con una presión atmosférica muy pequeña o en vacío como mejor opción, para eliminar el rozamiento con el aire y así disminuir las pérdidas mecánicas. Otra opción es utilizar helio dentro de la carcasa y no aire para reducir la fricción. Por otro lado para minimizar las pérdidas con los rodamientos, estos se eligen magnéticos como ya se ha comentado anteriormente.

Además, hay que tener en cuenta las pérdidas en el cableado de la máquina que acciona el volante ya que suelen trabajar con grandes corrientes. Para reducir estas pérdidas se debe dimensionar correctamente el cableado de la máquina.

5.6. Seguridad

En el funcionamiento de los FESS el mayor peligro es el debido a tener una masa rotando a alta velocidad, por lo que hay que asegurar la velocidad en 3 aspectos:

1. Se debe comprobar el correcto funcionamiento del volante para las especificaciones de diseño de máxima velocidad.
2. Se tiene que contar con una apropiada protección mediante un control adecuado del FESS. Así, se pueden desconectar con seguridad si una condición anormal sucede.
3. Esta relacionado con la contención. Para dos tipos de fallo: uno es el fallo permaneciendo intacto el rotor, y otro es el debido a una fragmentación en el rotor. En muchas ocasiones, por motivos de seguridad, el volante tiene que estar enterrado en un foso. Sin embargo con la mejora en los materiales con los que se hace el volante, esto ya no es necesario. Así, el empleo de compuestos de fibra reforzada con fibras orientadas circularmente en la fabricación de los volantes de inercia, se consigue que en caso de una grieta, ésta se desarrolle en forma circunferencial, siendo mucho menos propensos a que se desprenda fragmentos del

	DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL PREDICTIVO PARA EL ACCIONAMIENTO DE LA MÁQUINA DE RELUCTANCIA CONMUTADA DE UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO CINÉTICO PARA LA MEJORA DE LA EFICIENCIA EN LA EDIFICACIÓN
	Autor: JAVIER VILLEGAS NÚÑEZ
	Tutor: SERGIO VÁZQUEZ PÉREZ

volante en el caso de un fallo catastrófico. Además estos compuestos de fibra tienden a desintegrarse en caso de desprendimiento, no formando grandes fragmentos, por lo que la seguridad del sistema aumenta en un alto grado.

6. APLICACIONES

El almacenamiento cinético de energía ha sido utilizado desde hace siglos, sin embargo no ha sido hasta los últimos quince años que los avances en el campo de los materiales, la tecnología de rodamientos y la electrónica de potencia han permitido extender el uso de estos almacenadores desde sus aplicaciones tradicionales en máquinas de vapor y motores de combustión, donde las capacidades y tiempos de almacenamiento eran pequeños, a otras aplicaciones de mayor potencia y densidad energéticas [24].

Sistemas de alimentación ininterrumpida.

Los FESS pueden proporcionar protección contra las perturbaciones de tensión en la red eléctrica (aplicaciones de power quality), satisfaciendo a corto plazo picos en la demanda, y así evitar la necesidad de sistemas de respaldo. También puede proporcionar energía durante cortes de ésta, o para reducir la distorsión armónica y eliminar los huecos de tensión [18].

El interés comercial más establecido de los almacenadores cinéticos hasta la fecha es su empleo como fuentes de alimentación altamente fiables durante un intervalo de tiempo que puede ir desde unos pocos hasta miles de segundos. Así, tenemos los sistemas UPS, en los que los almacenadores deben ser capaces de responder ante cortes de luz, o ante huecos y caídas de tensión provocados por fallos en la instalación eléctrica o variaciones en la carga, asegurando de esta manera la calidad del suministro en todo momento.



DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL PREDICTIVO PARA EL ACCIONAMIENTO DE LA MÁQUINA DE RELUCTANCIA CONMUTADA DE UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO CINÉTICO PARA LA MEJORA DE LA EFICIENCIA EN LA EDIFICACIÓN

Autor: JAVIER VILLEGAS NÚÑEZ

Tutor: SERGIO VÁZQUEZ PÉREZ

Entre los proyectos más destacados sobre esta aplicación, el más importante es el de la planta basada en múltiples volantes de inercia funcionando en paralelo instalados en Dresden (Alemania), capaz de proporcionar o absorber 5 MW durante 5 s como mínimo. También destacar a The New Energy Development Organization (NEDO) en Japón, que esta intentando desarrollar FESS comerciales de 10 MWh.

Energías renovables

El almacenamiento de la electricidad generada por las fuentes renovables es otra aplicación importante. Los volantes de inercia son de especial interés para el almacenamiento localizado de la electricidad generada por los aerogeneradores y los paneles fotovoltaicos debido a la variable e intermitente naturaleza de su salida. De esta forma usando FESS, se podría eliminar la necesidad de la electrónica de potencia y control de realizar un seguimiento de las fluctuaciones y así mejorar la eficiencia eléctrica.

Este problema es muy importante en lo que se refiere al desarrollo de la energía eólica, la cual está limitada por ser la naturaleza de esta fuente de energía muy variable, ya que las empresas son reacias a que el viento constituya un tanto por ciento importante del total de los recursos energéticos con que cuentan para generar la electricidad que comercializan, debido a su variabilidad. El objetivo del uso de FESS en estos sistemas es suavizar los picos y valles de la energía eólica.

Por otro lado, en edificios que tienen sus propios sistemas de generación de energía renovables, disponer de esta capacidad de almacenamiento de la energía generada cuando no es consumida, permite aprovecharla y poder aportar esta energía cuando la fuente renovable no genera la suficiente potencia.

Aplicaciones espaciales.

Una de las aplicaciones para la cual el FESS es usado, es en la Estación Espacial Internacional (ISS). En estas aplicación, la energía primaria es el sol, pero la estación puede continuar operando gracias a los FESS mientras sucede un eclipse o





cuando la estación no esta expuesta directamente al sol. El reciente interés en las aplicaciones espaciales de los FESS se debe a las limitaciones que presentan las baterías químicas para las misiones aerospaciales. Por ello, los FESS fueron diseñados para reemplazar las baterías NiH₂ de níquel e hidrogeno en la ISS. Cada uno de estos volantes usados por la NASA almacena más de 15 MJ y puede ofrecer una potencia de pico de más de 4,1 kW [25].

Transporte y Vehículos híbridos

Otro campo de aplicación son los vehículos híbridos. Estos vehículos utilizan un motor de combustión interna conjuntamente con un motor eléctrico. La idea básica del FESS en un vehículo es que la potencia media para la propulsión de éste sea proporcionada por el motor de combustión, de manera que este puede operar de forma constante, a la velocidad optima, reduciendo el consumo de combustibles y la contaminación del aire, aumentando el tiempo de vida del motor [26]. Para aceleraciones y para subir pendientes, esta energía adicional necesaria se tomaría del volante de inercia, el cual se recarga a través del motor o través de la energía que se obtiene del frenado regenerativo.

Por otro lado, esta tecnología también se esta usando en metros y trenes, tanto urbanos como interurbanos, y en tranvías (en régimen de menor energía). Con estas características se han instalado estos equipos en los metros de Londres y Nueva York, y en línea de trenes como la del operador London Midland. Las ventajas de estos sistemas en estas aplicaciones son la provisión de potencia en los momentos de pico de demanda, el suavizado del perfil de tensión aliviando las fluctuaciones producidas por las cargas y reducción del consumo energético mediante el aprovechamiento del frenado regenerativo.

7. PRINCIPALES FABRICANTES

RWE PILLER (Alemania), proporciona sistemas UPS basados en volantes de inercia capaces de proporcionar hasta 1,65MW en tiempos de descargas menores de 10 s, aunque el régimen de descarga puede ser más lento proporcionando menores potencias, trabajando con velocidades del volante entre 3.600 y 1500 rpm.

PENTADYNE POWER (EEUU), ofrece dispositivos UPS de hasta 190kW durante descargas de 10 segundos, tiempos de recargas menores de 15 segundos.

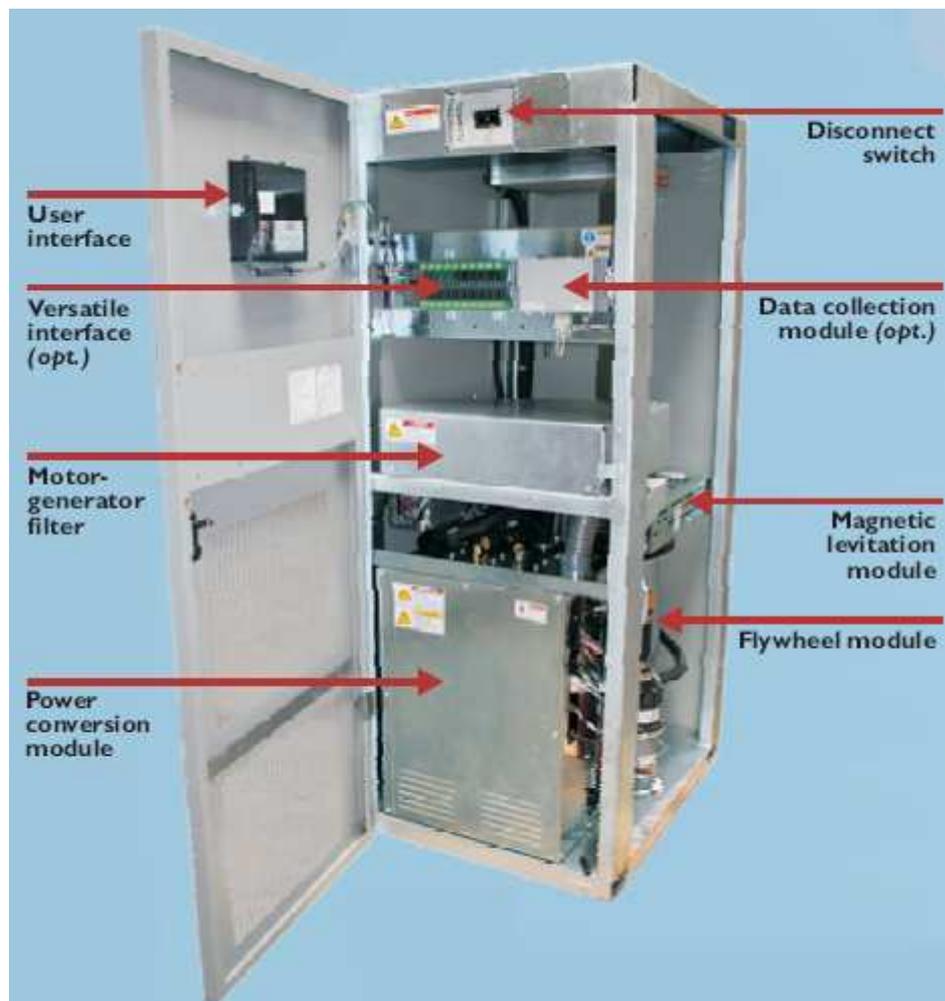


Figura 3.2. Módulo comercializado por Pentadyne [19].



ACTIVE POWER (EEUU), ofrece sistemas UPS capaces de suministrar hasta 4.75 MW funcionando en paralelo, con ciclos de vida de 20 años.

AFS-TRINITY (EEUU), UPS que proporciona picos de potencia de 250kW y 1,75kWh en energía útil almacenada.

BEACON POWER (EEUU), sistemas UPS de 100 kW durante 4 minutos, los cuales pueden operar funcionando en paralelo.

8. TENDENCIAS FUTURAS

El futuro pasa por mejorar los materiales con los que se realizan los volantes y conseguir velocidades de rotación más elevadas. También se intenta mejorar la electrónica de potencia para que no suponga una limitación en cuanto a la carga y descarga de potencia. Todo ello para conseguir aumentar la densidad de energía y de potencia de estos equipos.

- Energía específica ≈ 200 Wh/kg; (perspectivas de futuro)
- Potencia específica ≈ 30 kW/Kg; (perspectivas de futuro)
- Velocidades > 110.000 rpm; (perspectivas de futuro)