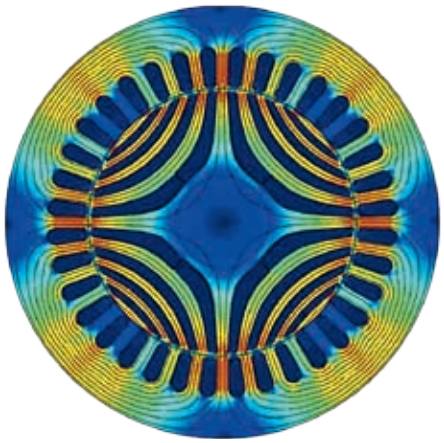
Fuerza impulsora

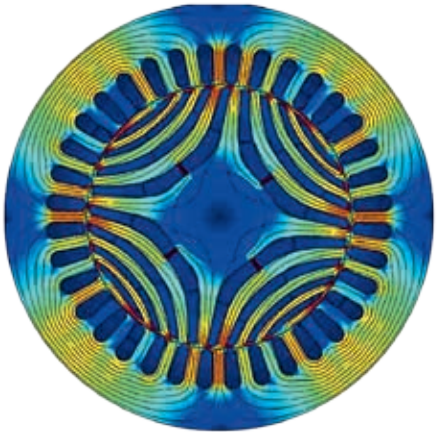
Los motores eléctricos sin tierras raras y ultraeficientes ofrecen soluciones sostenibles y fiables

FREDDY GYLLENSTEN, PETER ISBERG, ALESSANDRO CASTAGNINI, GIULIO SECONDO, JOUNI IKÄHEIMO, ARI TAMMI – En los motores eléctricos de alta eficiencia utilizados en aplicaciones industriales se suelen emplear imanes permanentes que contienen tierras raras (REE), como el neodimio y el disprosio. Estos elementos están sujetos a las variaciones de precio propias de la demanda cambiante del mercado. Avances recientes de la tecnología de motores con accionamiento de velocidad variable (VSD) permiten ahora construir motores de alto rendimiento sin REE. Uno de ellos es el motor de reluctancia síncrono (SynRM), caracterizado por la elevada eficiencia energética, la fiabilidad y el excepcionalmente sencillo mantenimiento. Otro es el motor de reluctancia síncrono ($SynRM^2$) con ferrita, más eficiente y potente que el SynRM.

1 Principio SynRM: el rotor producirá par siempre que exista un campo magnético en el entrehierro no alineado con el rotor.



1a El rotor está alineado con el campo magnético, por lo que no se produce par.



1b El rotor no está alineado con el campo magnético y se produce par (en sentido contrario a las agujas del reloj).

Si bien existen desde hace más de un siglo, los motores eléctricos continúan experimentando saltos innovadores y, en los últimos años, se observa un notable progreso en su eficiencia.

Dado que intervienen en una parte considerable de la conversión de energía (el 28–30% de toda la electricidad se convierte en energía mecánica en motores eléctricos), se presta una atención especial a su eficiencia y, en todas las regiones industrializadas, hay normas de eficiencia mínima (MEPS). Para reducir aún más el consumo y las emisiones de CO_2 de la industria, la legislación regional establece en ocasiones un nivel mínimo más elevado. En breve se adoptará en todas las regiones industrializadas el llamado nivel de clasificación IE3 como requisito mínimo para casi toda la gama de potencias de los motores eléctricos de baja tensión directos-en línea (DOL) de 0,12 a 1.000 kW y de 50 a 1.000 V. Por ahora no hay requisitos similares para los motores VSD, pero probablemente no tardará en haberlos.

Imagen del título
Los nuevos SynRM y SynRM[2] de ABB suponen un gran paso adelante en la tecnología de motores eléctricos sostenibles en términos de eficiencia y densidad de potencia. La imagen recoge el rotor único del SynRM.

Motores de inducción

El motor de inducción (IM) es, con diferencia, el más común en la industria. Este motor potente y eficiente no dispone de conmutador ni escobillas, por lo que resulta fiable y fácil de mantener. Se encuentra en desarrollo permanente para mejorar su eficiencia.

Pese a su uso universal, los IM presentan algunos inconvenientes debidos al giro asíncrono, que causa pérdidas de conducción en el rotor que afectan negativamente a la eficiencia, generan más calor y recalientan los cojinetes, con el consiguiente acortamiento de la vida útil.

Motores de imán permanente

Aunque se conocen desde hace tiempo, los motores de CA de imán permanente (PM) no fueron competencia para los IM hasta el decenio de 1980, con la creación de una nueva generación de imanes permanentes basados en materiales como el neodimio-hierro-boro (NdFeB), que desarrollaron independientemente General Motors y Sumitomo Special Metals en 1982. El requisito para la introducción de estos nuevos imanes en los motores fue el avance paralelo de los accionamientos de CA necesarios para controlarlos.

Los motores PM tienen imanes montados en la superficie del rotor o integrados en él. Además, a diferencia del motor de inducción asíncrono, en el que el rotor “resbala”, es decir, tiene una frecuencia rotacional más baja que el campo magnético que lo impulsa, el motor PM es síncrono, y gira en sincronismo con el campo magnético. Esto ofrece un control de la velocidad más preciso, más eficiencia y una temperatura inferior del rotor/cojinete. Los motores PM eliminan las pérdidas por conducción del rotor, reducen las pérdidas por conducción y efecto Joule del estátor (debido principalmente a la menor corriente) y muestran una curva de eficiencia más plana. También trabajan a menor temperatura que los IM, lo que prolonga la vida útil del aislamiento y los cojinetes. Además, los motores PM ofrecen más par con el mismo tamaño o el mismo par en un paquete más pequeño.

El 28–30% de toda la electricidad se convierte en energía mecánica en motores eléctricos.

Pero el uso de tierras raras (REE), como el neodimio o el disprosio, presenta inconvenientes. Los REE son caros y están sujetos a variaciones del precio. Además, el intenso campo magnético

2 IEC 60034-30-1

La norma IEC 60034-30-1 define los límites mínimos para distintas clases de eficiencia de motores que trabajan en línea: motores de inducción y motores con capacidad de arranque en línea, como los PM de arranque en línea (con jaulas como el IM para permitir el arranque) [2]. El problema de definir la eficiencia de los MR sinc y otros conceptos de VSD puro es que actualmente no existen para ellos normas de eficiencia. Pero la normalización está en marcha y una futura IEC 60034-30-2 incluirá estos tipos de motores. La definición de la clase de eficiencia de los SynRM de ABB ha utilizado los valores límite de la IEC 60034-30-1, aunque hayan trabajado con un VSD durante la pruebas de clasificación. El trabajo con un VSD dará lugar siempre a pérdidas mayores del motor para el mismo punto de trabajo que con el régimen sinusoidal propio del trabajo en línea, puesto que el VSD induce altas tensiones armónicas en el motor por conmutación de modulación de amplitud de impulsos (PWM), que se asocia con mayores pérdidas. Las eficiencias declaradas para los SynRM son, por lo tanto, conservadoras.

3 Los SynRM de ABB recibieron el Automation Award en la Feria SPS 2011 de Alemania. En la imagen, motor de reluctancia síncrono y accionamiento ACS880.

La temperatura de trabajo más baja de un SynRM tiene muchas ventajas: mayor vida útil del aislamiento e intervalos mayores de engrase o mayor vida útil de los cojinetes.

del rotor puede dificultar el mantenimiento, un aspecto clave para un motor industrial.

Las aplicaciones y los clientes que actualmente se decantan por motores PM pueden buscar alternativas en el futuro, dependiendo de la evolución de los precios y los mercados.

Motores sin REE

Una futura solución económica y ecológicamente sostenible puede estar en los motores sin REE. ABB acaba de presentar dos motores de este tipo para ofrecer más eficiencia, densidad de potencia elevada y ausencia de las complicaciones propias de los materiales con REE. Se trata del motor síncrono de reluctancia (SynRM) y del motor síncrono de reluctancia con imán permanente (SynRM[2]) con imanes de ferrita.

Motores síncronos de reluctancia para aplicaciones VSD

Los SynRM son supereficientes y se basan en un elegante principio conocido desde hace tiempo, pero que no se ha podido explotar plenamente hasta la reciente aparición de la sofisticada electrónica de control VSD. En los SynRM, el rotor está diseñado para generar una reluctancia magnética (resistencia al flujo de un campo magnético) mínima en una dirección y máxima en la dirección perpendicular → 1. El rotor gira a la misma frecuencia que el campo del estátor (como en el motor PM). Presentados en la Feria de Hannover de 2011 (ese mismo año, el SynRM obtuvo el Automation Award en la Feria SPS de Alemania), los primeros SynRM de ABB se diseñaron exclusivamente para su funcionamiento a velocidad variable.

Los SynRM funcionan mejor que los IM convencionales. Se pueden diseñar para un rendimiento elevado o para una densidad de potencia elevada con un tamaño menor al de un IM equivalente. Requieren menos mantenimiento, tienen una inercia reducida y son extremadamente fiables.

Sin imanes ni jaula, la construcción del rotor es más sencilla que la de los motores IM o PM.

La temperatura de trabajo más baja de un SynRM tiene muchas ventajas: mayor vida útil del aislamiento e intervalos mayores de engrase o mayor vida útil de los cojinetes (el fallo de los cojinetes es una importante causa de rotura del motor).

4 Prototipo de motor SynRM2 IE5 y rotores con un accionamiento ACS880

Los supereficientes motores SynRM se basan en un elegante principio conocido desde hace tiempo, pero que no se ha podido explotar plenamente hasta la reciente aparición de la sofisticada electrónica de control VSD.

El hardware de un SynRM de ABB es idéntico al de un IM equivalente de ABB. Solo el rotor es diferente. Esto simplifica el suministro de recambios y el mantenimiento. Además, la sustitución de un IM existente por un SynRM es sencilla.

En 2014 se amplió la gama de productos SynRM (SynRM²) con el modelo de 15 kW, presentado en Hannover como primer representante de ABB de una tecnología IE5.

Los avances recientes en la eficiencia de los SynRM de ABB han sido tan rápidos que se han superado las clasificaciones de eficiencia IE vigentes ➔ 2. Si bien la UE requiere IE3 como mínimo, ABB ya tiene un catálogo de SynRM IE4. El potencial de los SynRM no se ha explorado plenamente, y parece muy viable aumentar la eficiencia.

Es importante señalar que la clasificación de eficiencia afecta solo a los motores DOL, no a los VSD. Por tanto, la "clasificación" de los motores VSD de ABB se entiende en el marco de referencia utilizado para los motores DOL, que no refleja fielmente el funcionamiento con VSD; por ejemplo, el excelente rendimiento de los VSD con carga parcial y las pérdidas por armónicos sustancialmente menores que las de los IM con VSD.

Hay dos gamas de SynRM: SynRM IE4 (de 5,5 a 315 kW) y SynRM compactos de alto rendimiento (de 1,1 a 350 kW). Se ofrecen en varias combinaciones de motor/accionamiento ➔ 3–4:

- SynRM IE4 y ACS880 para usuarios industriales y finales
- SynRM IE4/HO y ACS850 para fabricantes de maquinaria y de equipos originales (OEM)
- SynRM IE4 y ACQ810 para los segmentos del agua y las aguas residuales
- SynRM IE4/HO y ACH580 para aplicaciones de calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC)

Como ya se ha dicho, la eficiencia se está convirtiendo en una cuestión crítica para los fabricantes de motores y siste-

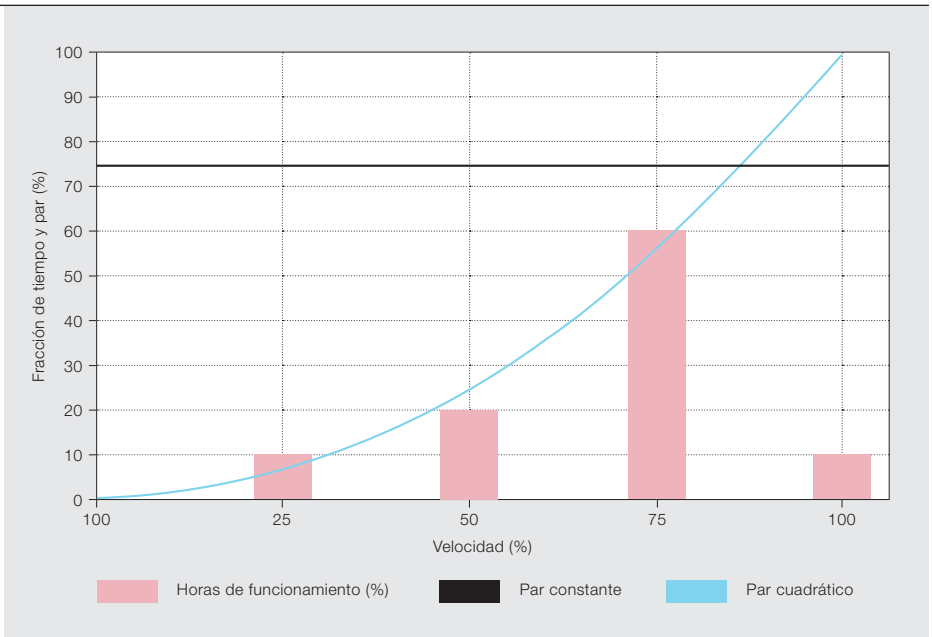
Los SynRM se pueden diseñar para un rendimiento elevado o para una densidad de potencia elevada con un tamaño menor que el de un IM equivalente.

5 Comparación de IM, SynRM y SynRM² de clases IE diferentes

Clase de eficiencia²	IE2	IE3	IE4	IE5[a]
Datos de motores¹ (a partir de pruebas en funcionamiento de convertidores de frecuencia)				
Producto de ABB	M3BP (160)	M3BP (160)	M3BL (160)	N.A. (160)
Tipo	IM	IM	SynRM	SynRM²
Potencia de salida (kW)	15	15	15	15
Velocidad (rpm)	1.500	1.500	1.500	1.500
Tensión (V)	380	380	380	380
Intensidad (A)4	29,9	29,5	31,5	25,2
Factor de potencia (-)	0,845	0,838	0,763	0,949
Eficiencia (%)	90,6	92,2	94,7	95,2
Datos del convertidor (tensión de red 400 V)				
Producto convertidor de ABB en pruebas	ACS850-035A	ACS850-035A	ACS850-035A	ACS880-087A
Convertidor de ABB propuesto para los usuarios finales	ACS880-032A	ACS880-032A	ACS880-032A	ACS880-032A
Tipo de control	DTC	DTC	DTC	DTC
Casos de comparación con motor IE2 y sistema de accionamiento como referencia				
Par constante (75%) (con 8.585 horas de trabajo anual en ciclo de servicio según el gráfico)				
Consumo anual de electricidad (kWh)	74.846	73.536	71.924	70.745
Ahorro anual de electricidad (kWh)[5]	0	1.310	2.922	4.100
Ahorro anual del coste de electricidad ($)	0	210	470	658
Potencia de salida media (kW)	7,6	7,6	7,6	7,6
Eficiencia media del sistema (%)	87,1	88,7	90,6	92,2
Tiempo de amortización (meses)	-	< 10	< 10	< 11
Carga de par cuadrático (con 8.585 horas de trabajo anual en ciclo de servicio según el gráfico)				
Consumo anual de electricidad (kWh)	56.386	55.335	54.089	53.275
Ahorro anual de electricidad (kWh)	0	1.050	2.296	3.110
Ahorro anual del coste de electricidad ($)5	0	168	368	500
Potencia de salida media (kW)	5,7	5,7	5,7	5,7
Eficiencia media del sistema (%)	86,7	88,4	90,4	91,8
Tiempo de amortización (meses)	-	< 12	< 13	< 15

1 Datos de motores probados en el punto nominal de trabajo
2 Límites de eficiencia mínima según la IEC 60034-30-1.
3 Todavía no se ha definido una clase de eficiencia IE5, pero se calcula que tendrá un 20 por ciento menos pérdidas que la IE4.
4 Intensidades extrapoladas a partir de valores medidos para armonizar con una tensión igual de 380 V, por simple comparación.
5 Las comparaciones se hacen con Alemania como ejemplo con un coste de la electricidad industrial de 0,16$/kWh.

5a Resumen de los datos de prueba



5b Base para los cálculos de energía

Después de 10 años de funcionamiento, el precio de compra inicial corresponde, para todos los sistemas VSD comparados, solo al 2–3% del coste de la electricidad.

mas de motores: la tendencia en la UE, Estados Unidos y Asia va hacia una legislación más exigente, tanto para los motores, como para el sistema en el que se integran. Y ABB va un paso por delante con la tecnología SynRM².

SynRM²

En 2014 se amplió la gama de productos SynRM (SynRM²) con un modelo de 15 kW y una altura de eje IEC de 160 mm ("SH160") que se presentó en Hannover como primera demostración pública de una tecnología "IE5" de ABB. Se prevé que la norma IE5, por ahora no definida en la IEC 60034-30-1, imponga unas pérdidas un 20% más bajas que la clase IE4. (Esta disminución en las pérdidas es típica entre las clases IE.)

Una característica exclusiva de este motor es que utiliza imanes de ferrita (óxido de hierro, Fe_2O_3), normalmente más baratos y fáciles de adquirir que los imanes permanentes de tierras raras. Su uso da lugar a un producto más económico y ecológicamente sostenible.

Las ferritas se han utilizado en aplicaciones de baja potencia pero, en la industria, un motor basado en ferrita no podría competir con un IM. Un motor debe generar una reluctancia dominante, respaldada por imanes de ferrita, para tener potencia suficiente. Con el rápido desarrollo y la creciente inteligencia de los accionamientos VSD, ahora es posible el control pleno y el uso de estos motores, como en el caso de los SynRM.

El SynRM² IE5 está diseñado para clientes que persiguen niveles de eficiencia y densidad de potencia cada vez mayores. Además, con factores de potencia equivalentes a los de los motores PM y excelentes propiedades de atenuación de campo, el SynRM² IE5 permite paquetes de motor+accionamiento más compactos. ABB está trabajando en una gama SynRM², de 0,55 a 15 kW para el mercado de HVAC, por ejemplo. Basándose en las atractivas propiedades de la tecnología de motores, ABB propone esta tecnología en otros campos de aplicación a los grandes OEM, para quienes sería de gran interés y beneficio.

Pruebas comparativas para diferentes tipos de motores con VSD

Las clases IE de eficiencia energética se definen para motores DOL en la norma IEC 60034-30-1 y se clasifican en el punto de trabajo nominal (a plena carga y velocidad máxima). Naturalmente, la eficiencia relativa de los motores y accionamientos VSD no quedan determinados solo por esta definición de clase de motores, pues no se tienen en cuenta los rendimientos con carga parcial y velocidad del punto de trabajo ni las pérdidas por armónicos debidas al convertidor de frecuencia y las del propio convertidor. Por lo tanto, las eficiencias del sistema con diferentes tipos de motores y clases

ABB está preparada para hacer frente a los requisitos de los motores DOL con el nuevo miembro de la familia SynRM (SynRM DOL), una versión del prototipo presentado en la Feria de Hannover de 2015.

de eficiencia se han caracterizado en pruebas → 5a Se utilizan dos perfiles de carga industrial diferentes y típicos –par constante (p. ej., cinta transportadora) y par cuadrático (p. ej., bombas y ventiladores)– frente a velocidad, según la definición de → 5b, incluidos los ciclos de servicio.

El ahorro de energía también se calcula con el motor de inducción IE2 y el sistema de accionamiento, tomando como referencia Alemania, con un precio de la electricidad industrial de 0,16 $/kWh. Dado que el coste de la electricidad es una parte tan importante del coste del ciclo de vida de los motores eléctricos industriales, el plazo de amortización cuando se adquiere un sistema VSD más eficiente es extraordinariamente corto. Los plazos de amortización en el caso del motor de inducción IE3, el SynRM IE4 y el SynRM2 IE5, utilizando convertidores ACS880-032A similares de ABB, en comparación con el sistema del motor de inducción IE2 de referencia, son inferiores a 10–15 meses, dependiendo del tipo de motor y el ciclo de trabajo. Tras estos plazos de amortización relativamente cortos, los sistemas más eficientes ahorran costes durante el resto de su vida útil. Después de 10 años de funcionamiento, el precio de compra inicial corresponde, para todos los sistemas VSD comparados, a solo el 2–3% del coste de la electricidad.

Pruebas de campo/ejemplo de implementación

Las instalaciones de las compañías de suministro de agua se encuentran entre los usuarios de electricidad más eficientes del Reino Unido. La estación de bombeo Somerford de South Staffordshire Water no es una excepción; aún así, su factura de electricidad anual asciende a unos 13 millones de dólares, de los que el 90% corresponde al bombeo de agua. El empeño de la empresa en incrementar la eficiencia energética condujo a la decisión de sustituir un IM de 115 kW y 20 años de antigüedad, controlado por un convertidor de frecuencia ACS800 de ABB más moderno, por un nuevo paquete de SynRM IE4 de 110 kW y un accionamiento ACS850. El accionamiento controla una bomba de pozo que extrae 2,5 millones de litros de agua al día. Las expectativas del cliente eran que la eficiencia mejoraría y que los costes de mantenimiento disminuirían con la utilización de la última tecnología de accionamiento de motores. Los resultados superaron con creces estas expectativas: ahorro de energía del 6%; reducción del 58% en los puntos críticos de temperatura del bastidor; reducción del 28% en la temperatura del cojinete final del motor; y reducción del 75% de ruido audible, en comparación con el motor de inducción reemplazado.

Motores para el futuro

En motores, ABB ofrece la solución adecuada para cualquier necesidad industrial y, como respuesta a la demanda del mercado de mayor producción, mayor eficiencia, intervalos de mantenimiento más prolongados y reducción del tamaño, ABB ofrece nuevos motores síncronos de reluctancia. Pero las ventajas ambientales del SynRM y el SynRM^2 no se limitan al ahorro de energía, ya que utilizan métodos de producción comunes y materiales abundantes de bajo impacto ambiental. Además, ABB está preparada para hacer frente a los requisitos de los motores DOL con el nuevo SynRM (SynRM DOL), una versión del cual se presentó en la Feria de Hannover de 2015. Esta tecnología, que combina una jaula especial (similar a la de los IM) con una estructura SynRM, está en desarrollo, pero ya ha demostrado que puede alcanzar niveles de IE4 (y, con una optimización meticulosa, de IE5) sin imanes REE ni materiales especiales.

El vanguardista diseño SynRM es la base de una tecnología de eficiencia sostenible para los motores eléctricos del futuro.

Freddy Gyllensten
Peter Isberg
ABB Discrete Automation and Motion,
Motors and Generators
Vasteras, Suecia
freddy.gyllensten@se.abb.com
peter.j.isberg@se.abb.com

Alessandro Castagnini
Giulio Secondo
ABB Discrete Automation and Motion,
Motors and Generators
Vittuone, Italia
alessandro.castagnini@it.abb.com
giulio.secondo@it.abb.com

Jouni Ikäheimo
Ari Tammi
ABB Discrete Automation and Motion,
Motors and Generators
Vaasa, Finlandia
jouni.ikaheimo@fi.abb.com
ari.tammi@fi.abb.com

Referencias

[1] M. Meza, "Industrial LV Motors & Drives: A Global Market Update – January 2014, IHS," presented at Motor & Drive Systems 2014 – Advancements in Motion Control and Power Electronic Technology, Orlando, FL, 2014.
[2] *Rotating Electrical Machines – Part 30-1: Efficiency Classes of Line Operated AC Motors*, IEC Standard 60034-30-1:2014.