

Determinación de pérdidas eléctricas en motores de inducción modelados electromagnéticamente con el método de los elementos finitos

Determining electrical loss in electromagnetically-modelled induction motors using the finite element method

Camilo Andrés Cortés¹, Wim Deprez², Johan Driesen³ y Jhon J. Pérez⁴

RESUMEN

Este artículo presenta el comportamiento de las pérdidas eléctricas en un motor de inducción de jaula de ardilla de 7,5 kW de potencia operando con alimentación balanceada y desbalanceada, modelando al motor con el método de los elementos finitos y comparando los resultados con pruebas en laboratorio del motor seleccionado. Se analiza la variación de la densidad de flujo magnético en cuatro lugares de la máquina en diversas situaciones de carga y desbalance. Los resultados obtenidos muestran que desde el punto de vista de las pérdidas totales del motor, la operación desbalanceada con subvoltajes es la situación más crítica para la máquina. En cuanto a la variación de las pérdidas en las partes del motor, se encontró que las pérdidas en el hierro tienen un comportamiento constante al variar la carga para cada tipo de alimentación, y en el lugar que las pérdidas presentan mayor aumento es en el rotor de la máquina.

Palabras clave: motor de inducción, desbalance, pérdidas eléctricas, método de elementos finitos.

ABSTRACT

This paper shows the pattern of a 7.5 kW squirrel-cage induction motor's electrical loss in balanced and unbalanced conditions, modelling the motor using the finite element method and comparing the results with experimental data obtained in the laboratory for the selected motor. Magnetic flux density variation was analysed at four places in the machine. The results so obtained showed that the undervoltage unbalanced condition was the most critical from the motor's total loss point of view. Regarding variation of loss in parts of the motor, a constant iron loss pattern was found when the load was changed for each type of voltage supply and that the place where the loss had the largest rise was in the machine's rotor.

Keywords: induction motor, unbalance, electrical loss, finite element method.

Recibido: abril 15 de 2008

Aceptado: octubre 31 de 2008

Introducción

El ahorro de energía es un factor importante en el crecimiento económico de un país (Muravlev *et al.*, 2005). Más del 50% del consumo de electricidad en Estados desarrollados y aproximadamente el 65% de la electricidad usada en la industria es consumida por motores eléctricos (Belmans *et al.*, 2005a, Belmans *et al.*, 2004A). Aunque esta conversión de energía tiene una alta eficiencia, una pequeña mejora en la capacidad por el uso de motores más eficientes puede conducir a ahorros significativos de energía eléctrica (Slaets *et al.*, 2000). El tema de la eficiencia de motores toma cada vez más importancia, como lo muestra la construcción de la base de datos de eficiencia de motores de la Comisión Europea, llamada Eurodeem (Mertens, 2007).

En general, las máquinas eléctricas son eficientes y confiables cuando se usan apropiadamente, pero muchos factores en el dice-

ño y operación de sistemas de maquinaria eléctrica pueden desperdiciar energía y causar fallas prematuras. Debido a su gran importancia económica y energética, es esencial optimizar la eficiencia y confiabilidad de los sistemas de máquinas eléctricas (Litman, 1995). Aún más: un reporte del centro de investigación adjunto a la Comisión Europea propone siete sistemas para que se pueda ahorrar cantidades sustanciales de energía, donde se identifica un potencial de ahorro total de 435TWh/año en Europa, equivalente a 200 millones de toneladas de emisiones de CO₂ (Bertoldi y Atanasio, 2007). Sorpresivamente, casi la mitad del potencial de ahorro reside en sistemas de motores eléctricos (De Keulenaer, 2007), de los cuales aproximadamente el 80% del consumo en países desarrollados se debe a motores de inducción. Considerando este potencial con respecto a los otros, se muestra la importancia que toma cada vez más este tema. Ahora bien, la mayoría de estos estudios se sitúan en la Comunidad Europea; sin embargo, es de esperarse resultados similares en países en vía de desarrollo. Además, compañías industriales y usuarios individuales se

¹Ingeniero electricista, Universidad Nacional de Colombia. Ph.D., en Ingeniería Eléctrica, Universidad Nacional de San Juan, Argentina. Profesor asociado, Universidad Nacional de Colombia. caacortesgu@unal.edu.co

² M.Sc., in Electrical Engineering, Katholieke Universiteit Leuven, Bélgica. Ph.D., Candidate, Katholieke Universiteit Leuven, Bélgica. Research Assistant, Katholieke Universiteit Leuven, grupo ELECTA, Bélgica. Wim.Deprez@esat.kuleuven.be

³ M.Sc., Electrical Engineering, Katholieke Universiteit Leuven, Bélgica. Ph.D., in Electrical Engineering, Katholieke Universiteit Leuven, Bélgica. Associate Professor, Katholieke Universiteit Leuven, grupo ELECTA, Bélgica. Johan.Driesen@esat.kuleuven.be

⁴ Ingeniero electricista, Universidad de La Salle, Colombia. M.Sc., en Ingeniería Eléctrica, Universidad Nacional de Colombia. Profesor asistente, Universidad de La Salle, Bogotá, Colombia. jhperez@lasalle.edu.co

podrán beneficiar claramente de maquinaria eléctrica bien diseñada y de alta eficiencia; y es más, el hecho de que sean ambientalmente amigables puede ser un argumento de *marketing* (Belmans *et al.*, 2005a).

El método de los elementos finitos (MEF) es un método numérico de simulación de fenómenos electromagnéticos que, aunque más complejo que los de las diferencias finitas, o el método de los momentos, es una técnica numérica mucho más potente y versátil para tratar problemas que incluyan geometrías complejas y medios heterogéneos (Sadiku, 2000). El MEF ha venido usándose desde hace ya varios años en el cálculo de las pérdidas en las máquinas eléctricas. Dems *et al.* (1995) muestran cómo se deben calcular las pérdidas en los devanados del rotor en un motor de inducción de jaula de ardilla, cuando se consideran los armónicos presentes. Chevalier *et al.* (1999) discuten la estimación de las pérdidas en el hierro de un motor de inducción usando el MEF. Driesen (2000) muestra las expresiones para calcular las pérdidas de Joule y las ocurridas en el hierro, incluyendo las pérdidas por histéresis y por corrientes Eddy, en un programa de cálculo numérico con el MEF. Yamasaki (2001) propone una metodología para calcular la eficiencia de motores de inducción para compresores de amoníaco, la cual es contrastada con mediciones en laboratorio. Finalmente, Yamasaki y Haurishi (2004) analizan la estimación de los diversos tipos de pérdidas en el motor de inducción usando el MEF, y cómo estas varían de acuerdo al estado de carga del motor. En este trabajo se usa una metodología similar a la usada por Yamasaki y Haurishi (2004) para evaluar las pérdidas de un motor de inducción, analizando también cómo se ven afectadas las pérdidas al operar el motor en variados niveles de desbalance de tensión de la fuente de alimentación. Estos análisis se contrastan con mediciones en laboratorio del motor de inducción modelado.

La operación del motor de inducción sujeto a una alimentación desbalanceada ha sido objeto de estudio desde hace varias décadas. De hecho, pueden encontrarse trabajos acerca de la operación del motor de inducción trifásico bajo condiciones de voltaje desbalanceado desde los pasados años cincuenta (Lee *et al.*, 1998). Sin embargo, en los últimos diez años se ha profundizado en el tema debido a la importancia creciente de la calidad de la potencia y el uso racional de la energía. Wallace *et al.* (1997A) retomaron el tema, y mediante experimentación investigaron los efectos del desbalance de tensión en la operación del motor de inducción, y si la forma como NEMA derratea el mismo es la adecuada. Fernández *et al.* (1998) estudiaron el comportamiento térmico del motor de inducción al ser alimentado con tensiones desbalanceadas usando el MEF, mostrando que aumenta la temperatura del mismo en estos estados comparados con alimentación balanceada. Sin embargo, no analizaron el efecto en las pérdidas ni en la eficiencia del motor. Lee *et al.* (1998) muestran la evolución del estudio en este tema, concluyendo que debe seguirse investigando al respecto. Wang (2001) y Kersting (2001) analizan el problema desde el punto de vista del derrateo del motor de acuerdo a análisis teóricos y experimentales, respectivamente. Faiz *et al.* (2004) muestran que el problema del cambio de la eficiencia del motor ante tensiones desbalanceadas depende del grado y del tipo de desbalance, y que es necesario hacer más estudios para comprender el fenómeno. Faiz *et al.* (2006) señalan luego de un estudio experimental que al derratear motores usados en condiciones de desbalance se puede lograr un aumento en la eficiencia de operación. Deprez *et al.* (2007A y 2007B) y Dexters *et al.* (2007) indican cómo la eficiencia de la máquina de inducción cambia dependiendo del estado de carga de la misma, su tipo de operación (motor o generador) o su grado y tipo de desbalance. Además, Deprez *et al.* (2007B) explican cómo varían los diversos tipos de

pérdidas de acuerdo al tipo y grado de desbalance. No obstante, no fueron encontrados estudios que usen el MEF para ayudar a esclarecer los efectos del desbalance de tensión en la eficiencia y las pérdidas del mismo. Vale la pena aclarar que el análisis del motor de inducción operando con fuentes desbalanceadas puede ser tratado con el método de las componentes simétricas (Boldea y Nasar, 2001; Mantilla, 2007).

Este artículo está distribuido de la siguiente manera: inicialmente se analiza cómo se debe modelar el motor de inducción con el MEF, luego se muestran las condiciones de operación estudiadas y se discute cómo se calcularon las pérdidas eléctricas con el MEF, posteriormente presentan y discuten los resultados obtenidos mediante simulación y su validación de forma experimental, para finalizar con las conclusiones del trabajo y las referencias.

Método de los elementos finitos

Debido a la necesidad de obtener una menor incertidumbre durante el proceso y análisis de las máquinas eléctricas se ha impulsado el desarrollo de varios modelos apropiados para calcular campos eléctricos y magnéticos. Estos métodos numéricos se basan en la determinación de la distribución de los campos magnéticos y eléctricos en los cuerpos bajo estudio, basados en la solución de las ecuaciones de Maxwell (Bianchi, 2005). El MEF es una técnica numérica que permite obtener una solución del campo, aun con campos variables en el tiempo y con materiales que son heterogéneos, no-isotrópicos, o no lineales. Usando el MEF, todo el dominio bajo análisis se divide en subdominios elementales, que son llamados elementos finitos, y las ecuaciones de campo se aplican a cada uno de ellos (Bianchi, 2005).

Análisis 2D Vs. 3D

Los motores de inducción son obviamente estructuras tridimensionales (3D). Sin embargo, para un análisis 3D se requiere subdividir toda la estructura en elementos finitos de 3D, lo que requiere un procesamiento pesado y un gran tiempo de cómputo. Es por eso que, si es posible, el problema de campo debe reducirse a un problema 2D (Hameyer y Belmans, 1999).

Los efectos 3D son particularmente importantes para determinar el desempeño de motores de inducción trifásicos. Estos se deben a la longitud finita del eje, es decir, a los bordes de las bobinas del estator y a los anillos del rotor, así como a la inclinación de las ranuras del rotor. Estos efectos 3D deben considerar elementos apropiados en el circuito equivalente, el cual es externo a la solución de campo (Bianchi, 2005). Normalmente el campo magnético dentro de una máquina eléctrica rotatoria se modela con su sección transversal, y casi nunca se modela la máquina con un modelo 3D, debido a que la complejidad de dicho modelo resulta en tiempos de cómputo demasiado altos (Driesen, 2000). Aunque algunos autores plantean usar análisis 2D combinados con análisis en 3D para aumentar la exactitud de los modelos, como por ejemplo (Hameyer *et al.*, 1998; Yamazaki, 1999; Yamazaki y Shinfuku, 2001; Yamasaki y Haurishi, 2004), en este trabajo se modelan los motores de inducción usando un análisis 2D. Es decir, se desprecia la inclinación de las barras del rotor, y los efectos de borde se modelan, incluyendo equivalentes circuitales entre la conexión de bobinas.

Modelado de motores de inducción con el método de elementos finitos

Para la obtención de los modelos es necesario contar con la información de los materiales usados en las distintas partes de la máquina, el número de polos, el tipo de bobinado, el calibre de los

conductores, el número de espiras, la configuración geométrica de todas las partes, etc. Se modeló una máquina de inducción de jaula de ardilla con las características expresadas en la Tabla 1. Se aclara que algunas características de la máquina no se dan a conocer por ser información confidencial del fabricante; sin embargo, se obtuvo acceso a los parámetros, por ejemplo, las dimensiones del entrehierro, dimensión del núcleo, tipo y forma de devanado, número de vueltas por bobina, entre otros.

Tabla 1. Datos de la máquina de inducción jaula de ardilla modelada y analizada

Características			
Polos	4	Potencia (kW)	7.5
Velocidad nominal (rpm)	1465	Par nominal (Nm)	0.6
# de ranuras del rotor	40	# de ranuras del estator	48
Tensión nominal (V)	220/380	Corriente nominal (A)	13.9/NA
Cos φ	0.86	Eficiencia (100%)	90.4
Par nominal (Nm)	48.1	Corriente a rotor bloqueado I _r /I _n	8.2

Para un correcto análisis, se identificó el tipo de devanado de cada máquina, el calibre de los conductores, el número de espiras por bobina, el largo de núcleo, la geometría de las láminas del estator y del rotor, la distancia del entrehierro, etc. De esta forma, se identificó cómo se conectan las bobinas del estator, y además se modeló el efecto de los bordes usando equivalentes circuitales. Para el cálculo del valor de la resistencia de los anillos finales del rotor se utilizó la propuesta de (Hameyer y Belmans, 1999), quienes mencionan que aunque esta resistencia es considerablemente menor a la del estator, su influencia en la resistencia equivalente puede ser grande de acuerdo a la operación del motor. Para calcular la resistencia de todo el anillo R_R se usa la expresión:

$$R_R = \frac{2\pi D_R}{\sigma(D_R - D_i)} K_R \tag{1}$$

Con

$$K_R = \frac{1 + \left(\frac{D_i}{D_R}\right)^{2p}}{1 - \left(\frac{D_i}{D_R}\right)^{2p}} \left(1 - \left(\frac{D_i}{D_R}\right)\right) \tag{2}$$

Siendo p el número de pares de polos, D_i el diámetro interno del anillo, t el grosor del anillo y D_R el diámetro externo del anillo. De acuerdo con lo anterior, la resistencia de cada anillo final de la máquina tiene un valor de 6.82186 μΩ, teniendo en cuenta que la conductividad del aluminio de la máquina tiene un valor de 3.81143x10⁵ S/mm. Para el cálculo de la resistencia de borde de cada bobinado en el estator se tuvo en cuenta el área de los conductores usados en los bobinados, la conductividad del material utilizado, el número de espiras en cada bobina y las dimensiones físicas de la máquina. De esa forma, se obtuvieron valores de resistencia de borde de los devanados del estator de valor R_{end_sta} = 9.25 mΩ.

Condiciones de operación del motor

Con el paquete de simulación de MEF Magnet de Infolytica se modeló la máquina, incluyendo el cálculo de las pérdidas en las distintas partes de la misma, de modo tal que se simuló su operación ante diversos estados de carga, descritos por el deslizamiento, y

ante tres alimentaciones trifásicas, una de ellas con valores nominales, y las dos restantes con desbalances trifásicos de sobre y sub-voltajes. Existen varias definiciones del desbalance de tensión en normas y la literatura técnica (Mantilla, 2007; Faiz et al., 2004; Pillay et al., 2002; Eguiluz et al., 1999; Jiang et al., 1998). Sin embargo, en este trabajo se adopta la definición de la Comisión de Electrotecnia Internacional (IEC), donde se define al desbalance de tensión como:

$$\%VUF = \frac{\text{Voltaje de secuencia negativa} - V_2}{\text{Voltaje de secuencia negativa} - V_1} \cdot 100 \tag{3}$$

Deprez et al. (2007B) muestran cómo la definición de la Ecuación (3) tiene un lugar geométrico en forma de cilindro para un %VUF constante, y muestran experimentalmente cómo para distintos tipos de desbalance (trifásico, bifásico y monofásico) con un mismo %VUF se obtienen distintas curvas de eficiencia. En este trabajo se investigan los casos de desbalance trifásico, siendo estos los de mayor impacto sobre la operación de la máquina. En la Tabla 2 se muestran los casos de alimentación estudiados, con un VUF% de 4, siendo esto menor al límite propuesto como aceptable por la IEC, de 5%.

Tabla 2. Casos considerados de alimentación de tensión

Caso	V _a [V]	V _b [V]	V _c [V]	VUF %	V ₁ [V]	V ₂ [V]
Balanceado	230 ∠90°	230 ∠-30°	230 ∠-150°			
Sobrevoltaje trifásico (OV)	235 ∠90°	270 ∠-30°	249 ∠-150°	4.044	251.322	10.164
Subvoltaje trifásico (UV)	220 ∠90°	195 ∠-30°	195 ∠-150°	4.100	203.325	8.336

Obtención de los modelos de pérdidas

Las pérdidas en motores de inducción de jaula de ardilla pueden clasificarse como (IEEE, 2004): 1. Mecánicas; 2. Primarias de cobre – las pérdidas de Joule en el devanado primario; 3. Secundarias de cobre – las pérdidas de Joule en la jaula del rotor; 4. Pérdidas en el hierro – las ocasionadas por histéresis y corrientes de Eddy en los núcleos del rotor y del estator; 5. Dispersas (stray load losses): pérdidas eléctricas a excepción de 2-4.

Sin embargo, cuando las pérdidas se separan de los resultados de mediciones de un motor, no siempre se satisfacen las relaciones anteriores (Yamazaki y Haruishi, 2004). Es por eso que el análisis con el método de los elementos es una herramienta de gran ayuda para el análisis de las máquinas.

Con el objeto de obtener las pérdidas del motor bajo estudio en diversos puntos de operación, se deben calcular las pérdidas de la siguiente forma:

-Pérdidas en el hierro: son generalmente descompuestas en tres términos: Pérdidas de histéresis, pérdidas de corrientes parásitas (como función del grosor de las láminas), y pérdidas de corriente parásitas anómalas (Bianchi, 2005). Hacer un tratamiento consistente de las pérdidas en el hierro es una tarea difícil, ya que entre otras tareas se requiere que se incluyan los efectos de histéresis. Es por eso que el software usado se basa en datos empíricos, usando curvas de pérdidas empíricas proporcionadas por los fabricantes. Así, las pérdidas en el hierro son obtenidas en el software Magnet mediante la integración de las pérdidas en los materiales ferromagnéticos, usando el campo magnético B calculado en cada elemento, y las curvas de las propiedades de los materiales.

Pérdidas de Joule en el estator: estas se calculan mediante la división de las habidas en las bobinas modeladas y en las resistencias

que modelan el efecto de borde. Para las primeras, el cálculo se obtiene mediante la aplicación de la ecuación (4). Estas pérdidas no incluyen las ocurridas en el hierro.

$$P = \int_V \rho \mathbf{J} \cdot \mathbf{J} dv = \int_V \frac{\mathbf{J} \cdot \mathbf{J}}{\sigma} dv \quad (4)$$

-Las pérdidas en los bordes se calculan usando las corrientes obtenidas al solucionar el modelo en cada punto de operación.

-Pérdidas de Joule en el rotor: se calculan de la misma forma que las pérdidas de Joule en el estator, usando las propiedades correspondientes del material (en este caso, aluminio 0,997)

-Pérdidas mecánicas: son las únicas que no se calculan, debido a que los modelos desarrollados son únicamente electromagnéticos. Para su estimación se tomaron las pérdidas medidas en laboratorio para la máquina bajo estudio.

Puede observarse que en el cálculo de las pérdidas no es necesario calcular las dispersas, ya que están incluidas en las pérdidas eléctricas calculadas directamente con el MEF (Yamazaki y Haruishi, 2004).

Resultados

Con el objetivo de validar el modelo obtenido se realizaron pruebas para contrastar los parámetros calculados con las especificaciones nominales de la máquina. Para ello, se usaron varios tipos de análisis, que brindan diferente información sobre la modelación planeada.

Análisis con los solucionadores estático y armónico 2D

Luego de modelar las máquinas, lo primero que se debe confirmar es la distribución de flujo en las máquinas en un análisis estático. Hameyer y Belmans (1999) mencionan que las máquinas rotatorias requieren tener suficientes elementos finitos en el entrehierro y en las barras debido a que en dichos lugares es donde se encuentran los mayores gradientes de campo. Para cumplir dicho fin, se dividió el entrehierro en tres zonas (interna, media y externa), y se forzaron 400 y 600 vértices de elementos en las divisiones de las mismas, tal como se muestra en la Figura 1.

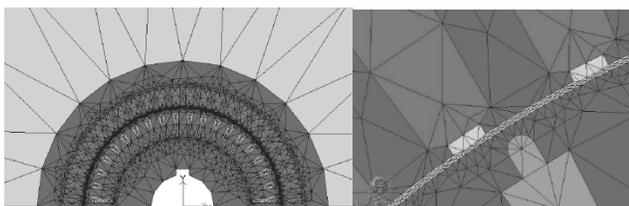


Figura 1. Malla de elementos finitos usadas en las simulaciones

En la Figura 2 se puede apreciar la distribución de flujo de la máquina cuando es alimentada de forma balanceada con parámetros nominales. En ella se muestra como la distribución de campo es adecuada para este tipo de máquina de inducción de cuatro polos.

Con el análisis 2D armónico se puede simular la prueba de rotor bloqueado de un motor de inducción. Durante la prueba, el rotor es bloqueado en una posición fija y corrientes sinusoidales trifásicas son forzadas en los devanados del estator. La frecuencia de los parámetros en el rotor es la misma que la de la fuente, debido al bloqueo del rotor. Usando la corriente de rotor bloqueado especificada por el fabricante, se obtuvo un par de 24.6 N/m. Este par

corresponde al esperado, debido a que se modela media máquina para reducir tiempos de cómputo.

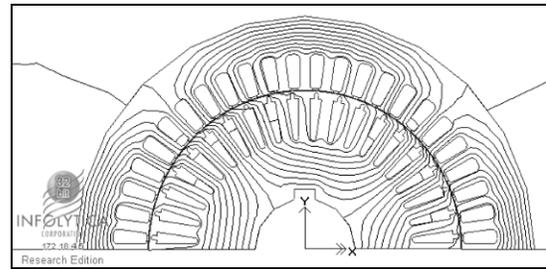


Figura 2. Distribución de flujo de la máquina, solucionador 2D estático

Análisis con el solucionador transitorio con movimiento 2D

Para determinar las distribuciones de flujo de la máquina en diversos puntos de operación, además del cálculo de las pérdidas se usó el solucionador *transitorio con movimiento 2D*. Se utilizó el método de Newton-Raphson para la solución de los modelos, con un número máximo de iteraciones para el NR de 20, orden de polinomios de 2, tolerancia del NR de 1%, usando materiales de tipo no lineal. Las simulaciones se obtuvieron para tiempos de 250 ms, con intervalo de tiempo de 0,25 ms, donde se observó que la máquina se encontraba ya en operación de estado estable.

Flujos en la máquina ante varios puntos de operación

En esta sección se muestra la variación del flujo magnético en cuatro partes del corte transversal del motor de inducción, tal como lo proponen Yamazaki y Haurishi (2004): En la mitad de dos dientes del estator y del rotor, y en la parte superior de ellos, es decir, al lado de la frontera entre el estator o rotor y el entrehierro.

El primer caso para analizar es la operación balanceada del motor de inducción operando a velocidad sincrónica ($s=0,0$). La Figura 3 muestra cómo la magnitud del campo magnético en el estator tiene una forma casi sinusoidal, incluso en la parte superior del diente analizado. Esto es de esperarse, como lo mencionan Yamazaki y Huruishi (2004). El campo magnético en el diente del rotor es prácticamente un campo dc, debido a que se está operando a velocidad sincrónica. En contraste, el campo magnético en la superficie del diente del rotor incluye una gran cantidad de armónicos, los cuales son causados por las ranuras del estator y el movimiento del rotor (Yamazaki y Huruishi, 2004).

El segundo caso es la operación balanceada del motor de inducción operando a su potencia nominal ($s=0,023$). La Figura 4 señala cómo ahora la magnitud del campo magnético en el estator tiene una gran cantidad de armónicos, especialmente en la parte superior del diente. La causa del incremento de armónicos es el rizado de las ranuras del rotor (Yamazaki y Haruishi, 2004).

La Figura 5 exhibe el caso para la operación con desbalance de subvoltajes del motor de inducción operando a su velocidad sincrónica ($s=0,00$). Dicha figura indica cómo ahora la magnitud del campo en el estator tiene una mayor cantidad de armónicos que la Figura 3. Esto se debe a la aparición de una tensión de componente negativa en la alimentación del motor. Sin embargo, para este caso el aumento de los armónicos es bajo. Un comportamiento similar se encontró en el caso con sobrevoltajes, pero con un nivel mayor de armónicos.

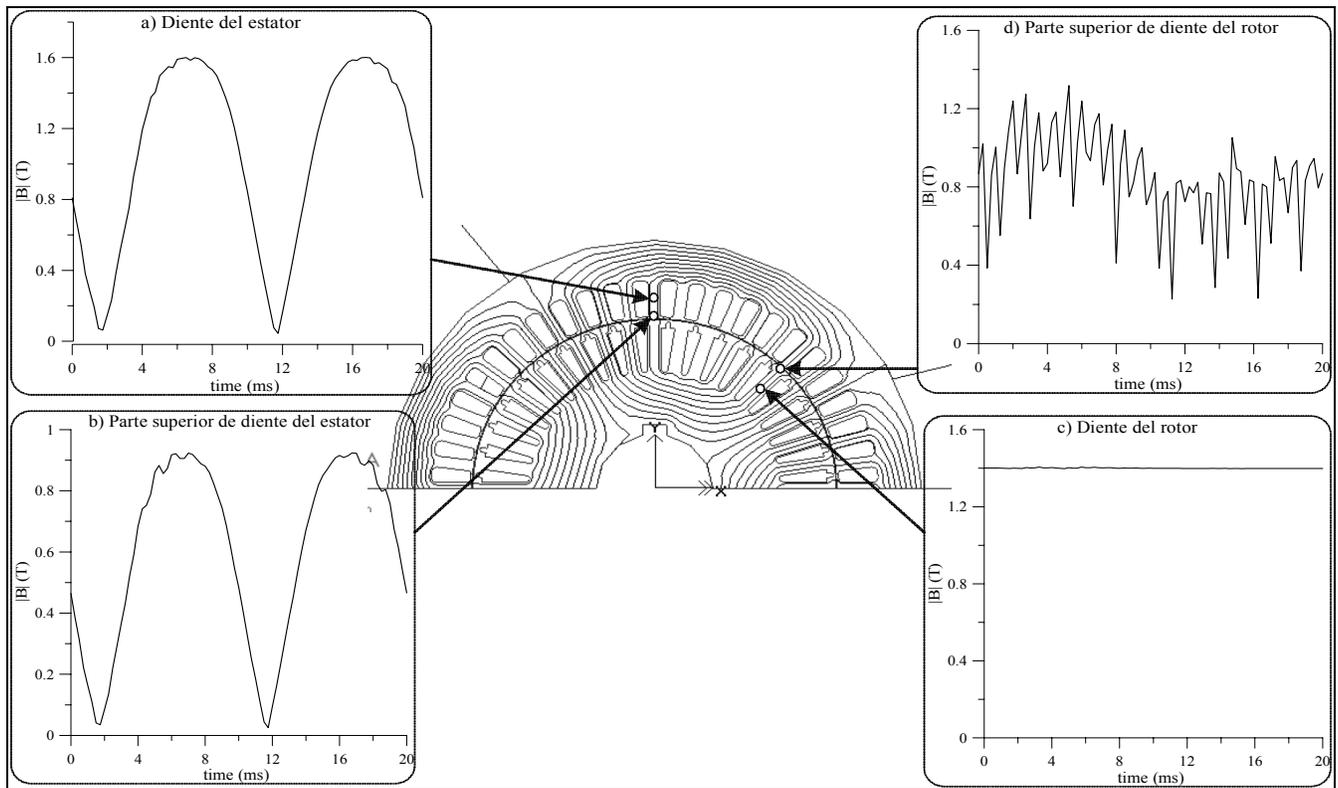


Figura 3. Distribución del flujo de la máquina a 230 ms, operación balanceada, sin carga ($s=0,00$)

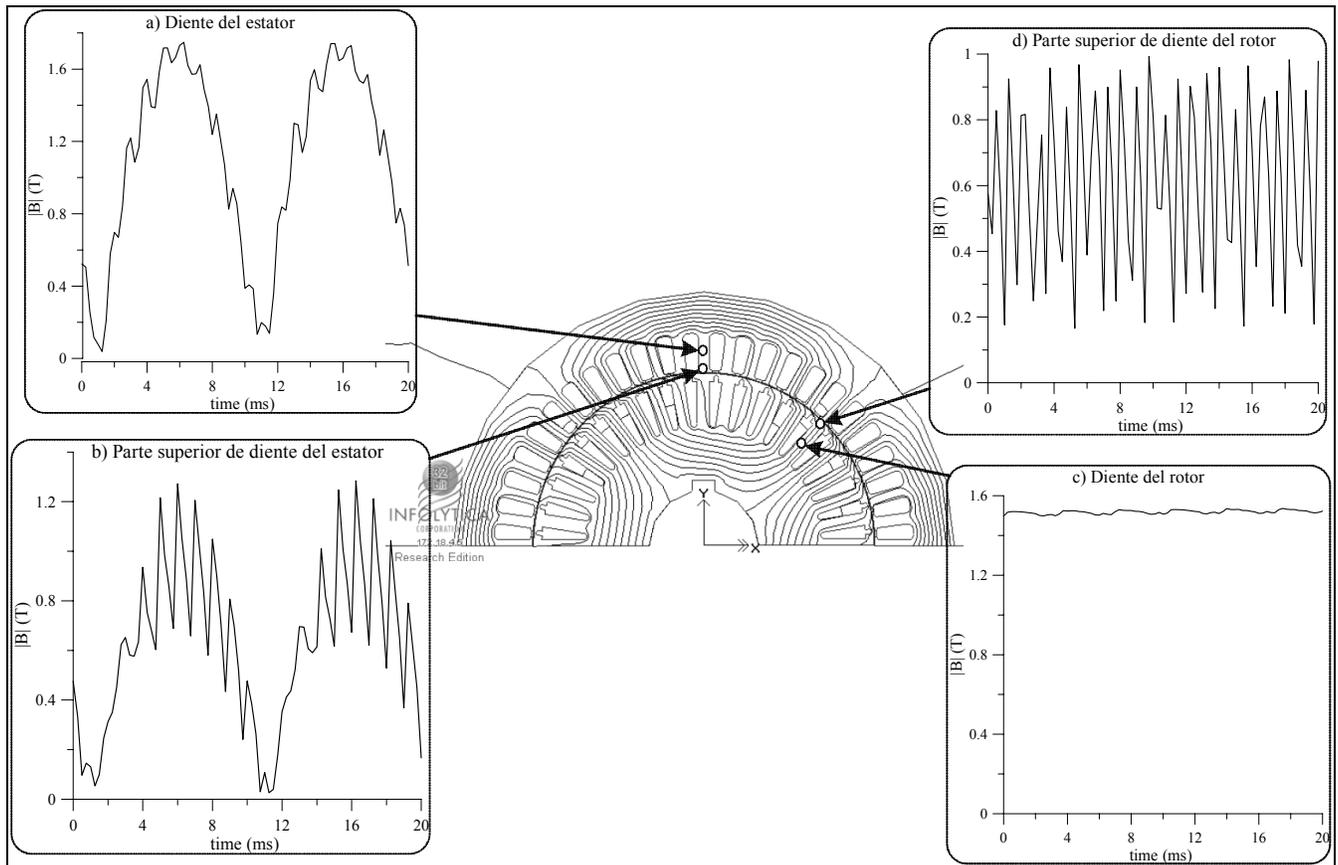


Figura 4. Distribución del flujo de la máquina 241,5 ms, operación balanceada, plena carga ($s=0,023$)

La Figura 6 despliega la operación desbalanceada con sobrevoltajes del motor de inducción operando a su deslizamiento nominal ($s=0,023$), donde no sólo la magnitud del campo magnético en el estator tiene una gran cantidad de armónicos, especialmente en la parte superior del diente, sino que también el campo magnético en el estator deja de comportarse como CD. Esto igualmente ocu-

rrer en el caso de operación balanceada con carga nominal, pero con una frecuencia mucho menor a la observada en este caso. Esto nuevamente es causado por el aumento de armónicos de secuencia negativa. Sería de esperarse una mayor cantidad de pérdidas en el estator por tal fenómeno.

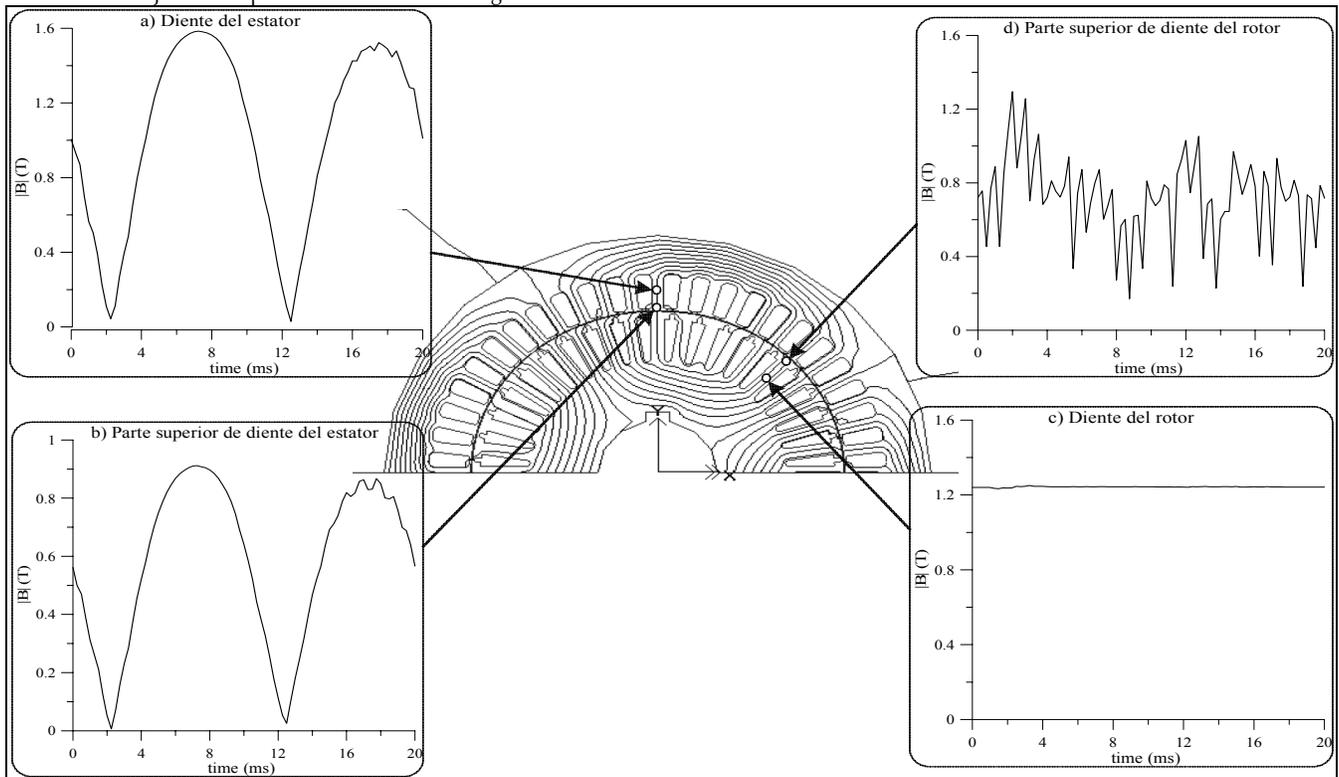


Figura 5. Distribución del flujo de la máquina a 230 ms, operación desbalanceada con subvoltajes, sin carga ($s=0,00$)

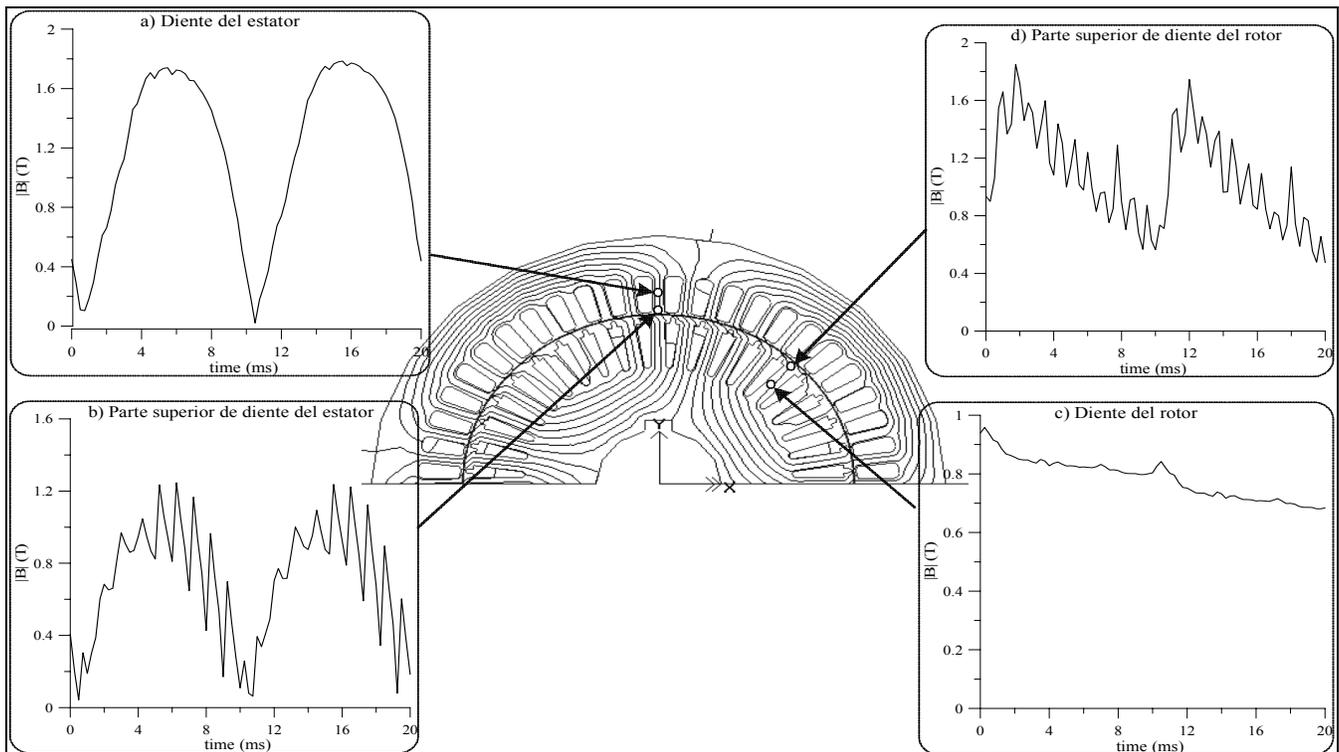


Figura 6. Distribución del flujo de la máquina a 245 ms, operación desbalanceada con sobrevoltajes, con deslizamiento nominal ($s=0,023$)

Cálculo del par

Un método para obtener la potencia de salida del motor de inducción con el MEF es calculando previamente el par de la máquina. La Figura 7 muestra la variación del par del motor modelado en los tres casos analizados, con respecto a la velocidad (a) y al deslizamiento (b). Este cálculo concuerda con las mediciones experimentales del par de la máquina reseñadas a continuación.

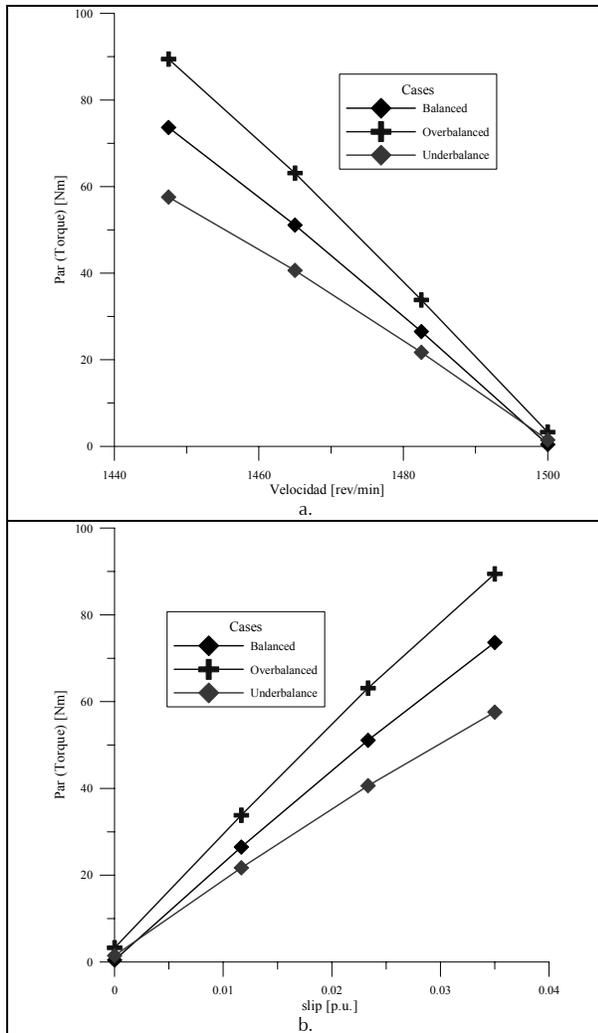


Figura 7. Par calculado de acuerdo al tipo de operación, con respecto a la (a) velocidad y al (b) deslizamiento

Pérdidas en el hierro

La Figura 8 señala la variación de las pérdidas en el hierro para los tres casos analizados ante diversos valores de deslizamiento. Se encuentra que las pérdidas son aproximadamente constantes para un mismo nivel de desbalance, sin importar la condición de carga.

Pérdidas de Joule en el rotor

La Figura 9 exhibe la variación de las pérdidas en el rotor (sin incluir las pérdidas en el hierro) para los tres casos analizados ante diversos valores de deslizamiento y de potencia de salida en p.u. Se encuentra que las pérdidas crecen a medida que aumenta la carga. Sin embargo, al comparar las Figuras 8 y 9 se observa que las pérdidas son proporcionales al deslizamiento, siendo el mayor aumento resultado de una operación desbalanceada con sobrevoltajes, y el menor, con una operación desbalanceada con subvoltajes.

En contraste, al analizar la Figura 9b, se aprecia que para una misma potencia de salida las mayores pérdidas en el rotor se obtienen en la operación de desbalance de subvoltajes. Esto se confirma más adelante.

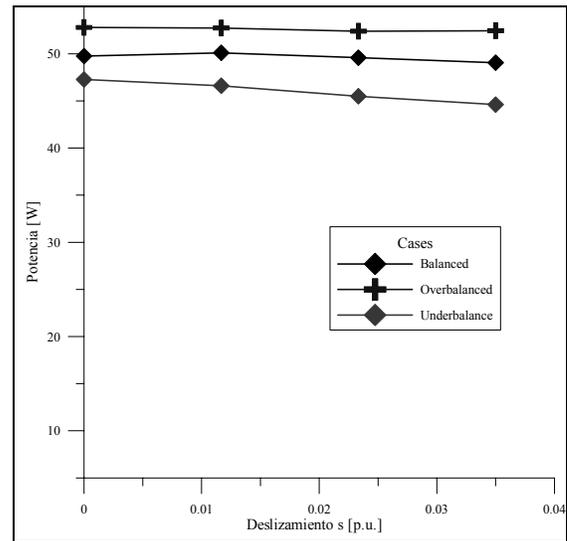


Figura 8. Pérdidas en el hierro del motor de inducción bajo estudio con respecto al deslizamiento

Pérdidas de Joule en el estator

La Figura 10 indica la variación de las pérdidas en el estator (sin incluir las pérdidas en el hierro) para los tres casos analizados ante diversos valores de deslizamiento y de potencia de salida en p.u. Se encuentra nuevamente que las pérdidas crecen a medida que aumenta la carga y son proporcionales al deslizamiento, siendo el mayor aumento resultado de una operación desbalanceada con sobrevoltajes, y el menor, con una operación desbalanceada con subvoltajes. Sin embargo, al analizar la Figura 10b se ve que las pérdidas en el estator son mayores para las operaciones de desbalance, siendo mayores las habidas para bajas potencias en la operación con sobrevoltajes, y para altas potencias en la operación con subvoltajes. Nuevamente estos resultados se confirman en la sección 5.3.

Pérdidas totales de la máquina

La Figura 11 despliega la variación de las pérdidas del motor de inducción modelado para los tres casos analizados ante distintos valores de deslizamiento y de potencia de salida en p.u. Las pérdidas crecen a medida que aumenta la carga y son proporcionales al deslizamiento, siendo el mayor aumento resultado de una operación desbalanceada con sobrevoltajes, y el menor con una operación desbalanceada con subvoltajes. Sin embargo, al comparar los resultados desde el punto de vista de la potencia de salida, se observa que las pérdidas son mayores para una operación de desbalance, siendo mayores las habidas para bajas potencias en la operación con sobrevoltajes, y para altas potencias en la operación con subvoltajes.

Obtención experimental de las pérdidas eléctricas de la máquina bajo estudio

Para validar los resultados encontrados se procedió a compararlos con los resultados experimentales llevados a cabo en los laboratorios del grupo Electa de la Universidad Católica de Lovaina, Bélgica. En las pruebas se usó el montaje que se muestra en la Figura

12. Se usó la metodología IEEE 112 B descrita en la norma IEEE 112 de 2004 (IEEE 2004) para hallar las pérdidas de la máquina.

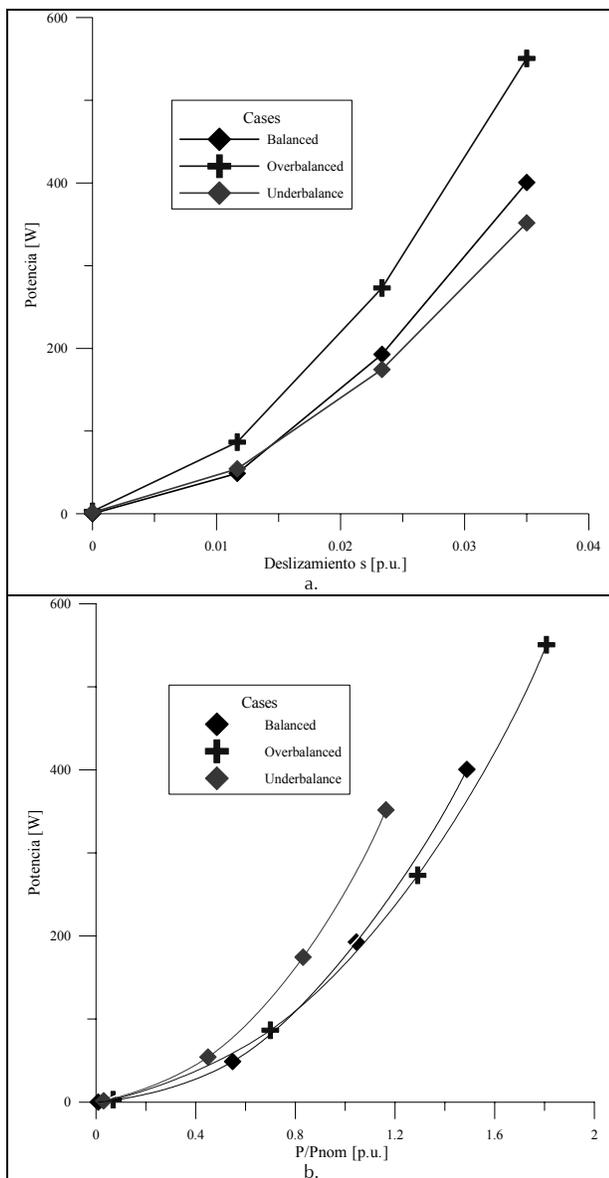


Figura 9. Pérdidas de Joule en el rotor del motor de inducción bajo estudio con respecto al (a) deslizamiento y (b) la potencia de salida en p.u.

La Figura 13 exhibe la medición del par del motor de inducción bajo estudio con respecto a la velocidad del mismo. Comparándola con la Figura 7 se puede ver que existe una buena concordancia entre los resultados experimentales y los de simulación.

La Figura 14 muestra la medición de las pérdidas en el hierro del motor de inducción bajo estudio. Comparándola con la Figura 8 se aprecia que las pérdidas también son aproximadamente constantes para un mismo nivel de desbalance, sin importar la condición de carga. Sin embargo, los valores de las pérdidas difieren considerablemente. Esto puede explicarse debido a que no se tiene certeza acerca de las curvas de pérdidas de los materiales usados en los núcleos del estator y del rotor, ya que es una información no suministrada por el fabricante. No obstante, para el problema analizado, las pérdidas en el hierro no son una variable de interés debido a ya mencionado comportamiento constante.

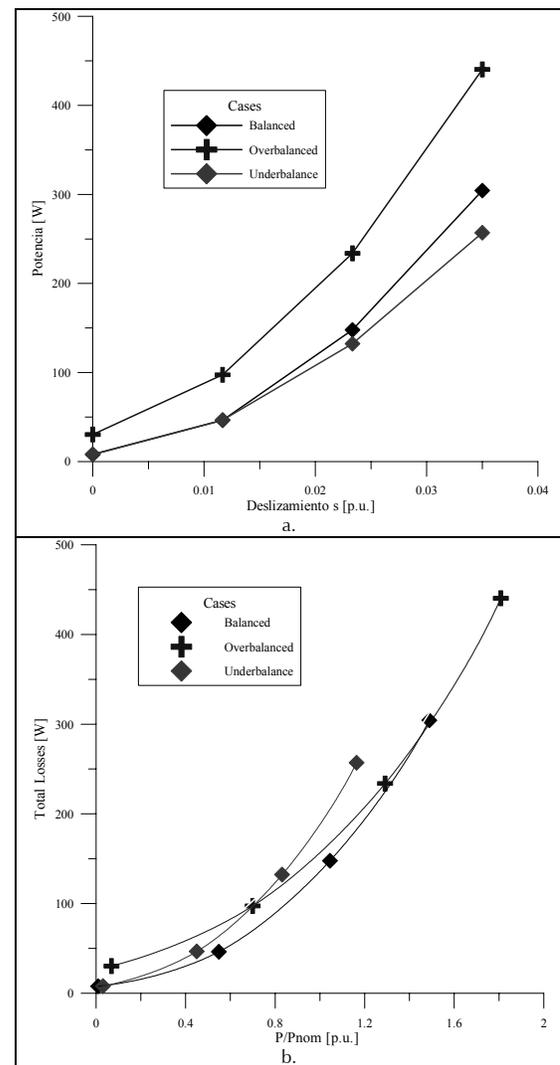


Figura 10. Pérdidas de Joule en el estator del motor de inducción bajo estudio con respecto al (a) deslizamiento y (b) la potencia de salida en p.u.

La Figura 15 enseña la medición de las pérdidas en el rotor del motor de inducción bajo estudio. Al compararla con la Figura 9b se observa que las pérdidas tienen el mismo comportamiento de acuerdo a la potencia de salida. Nótese que los valores de las pérdidas difieren con los calculados. Sin embargo, en la medición no están incluidas las pérdidas dispersas del rotor.

La Figura 16 muestra la medición de estas pérdidas de acuerdo a la metodología IEEE 112B. Si se suman ambas pérdidas, se obtienen valores bastante cercanos entre las mediciones y los cálculos.

Por último, la Figura 17 ofrece la medición de las pérdidas en el estator del motor de inducción bajo estudio. Al compararla con la Figura 10b se constata que no sólo las pérdidas tienen el mismo comportamiento de acuerdo a la potencia de salida, sino que también los valores de las pérdidas concuerdan con los cálculos realizados en el programa de elementos finitos.

Conclusiones

Usando el método de los elementos finitos es posible calcular adecuadamente las pérdidas eléctricas del motor de inducción en varios estados de operación si se cuenta con toda la información del mismo, incluyendo dimensiones geométricas de cada una de sus partes, propiedades de los materiales, etc. En este trabajo se adm-

te que con los paquetes computacionales actuales es posible en el término de un año obtener resultados que permiten profundizar en el análisis de máquinas eléctricas rotatorias.

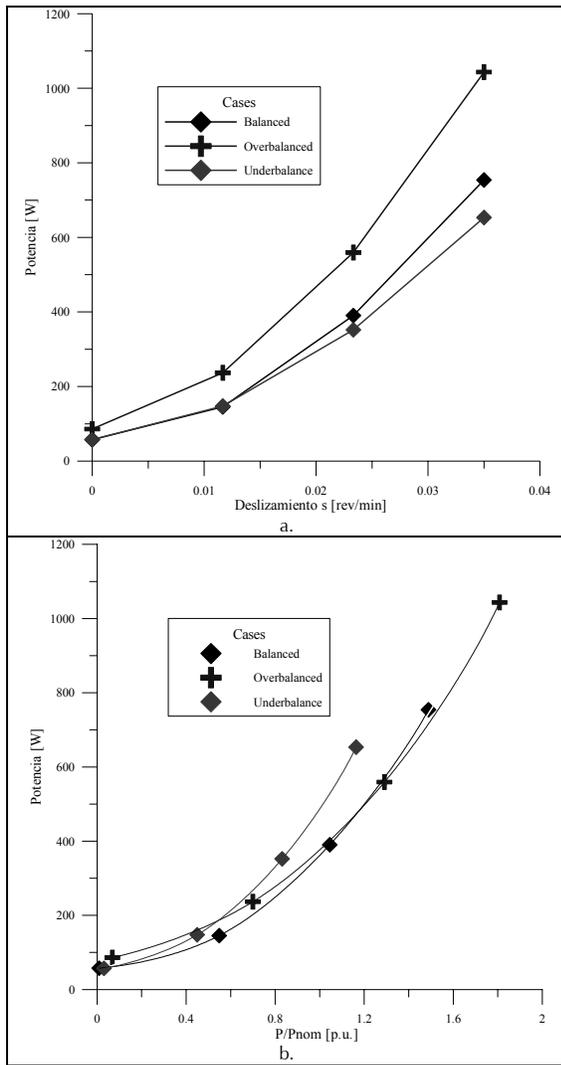


Figura 11. Variación de las pérdidas totales del motor de inducción bajo estudio con respecto al (a) deslizamiento y (b) la potencia de salida en p.u.

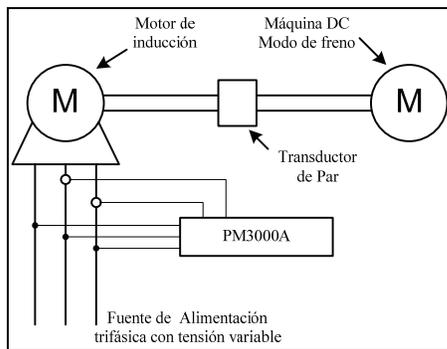


Figura 12. Montaje usado para la experimentación en la máquina objeto de estudio

Las pérdidas en el rotor son las que más aumentan a medida que se incrementa la carga en el motor, y una mejora en los materiales (por ejemplo, el uso de cobre en la jaula de ardilla en lugar de alu-

minio), o en la distribución geométrica de sus partes, puede mejorar la eficiencia del mismo.

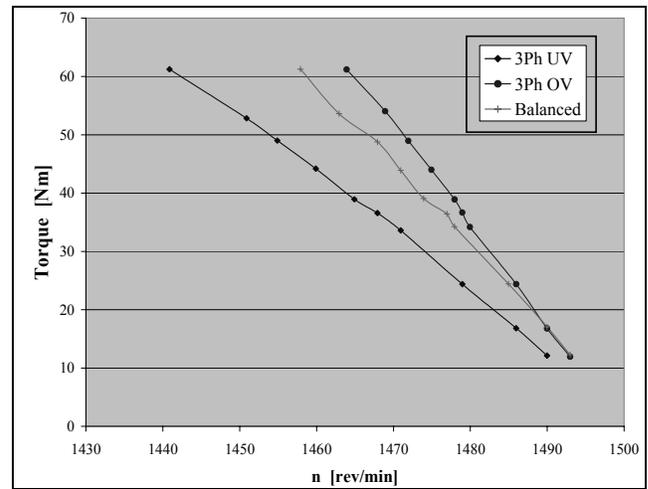


Figura 13. Par medido de acuerdo al tipo de operación, con respecto a la velocidad

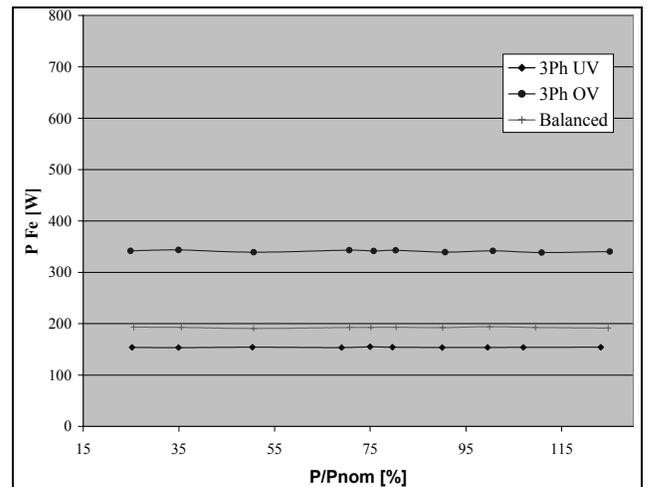


Figura 14. Pérdidas en el hierro medidas del motor de inducción bajo estudio

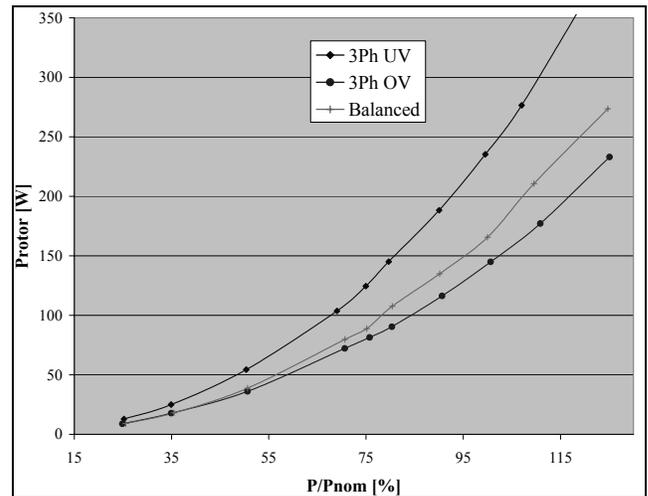


Figura 15. Pérdidas en el rotor medidas del motor de inducción bajo estudio

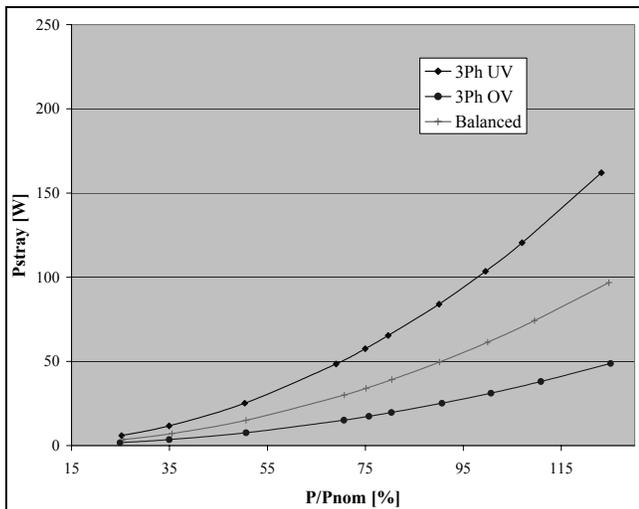


Figura 16. Pérdidas dispersas medidas del motor de inducción bajo estudio

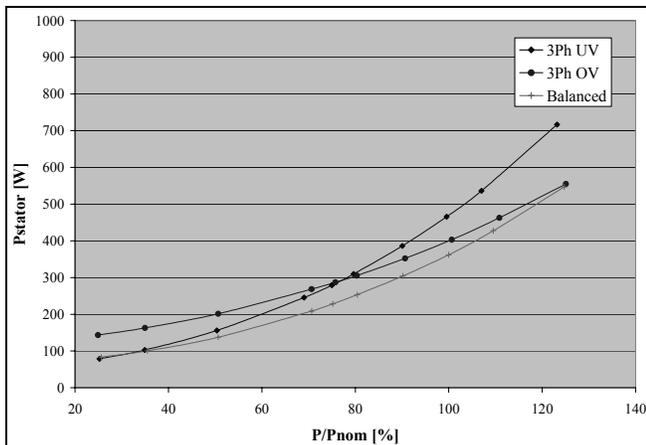


Figura 17. Pérdidas en el estator medidas del motor de inducción bajo estudio

En cuanto al tema de elementos finitos, el análisis presentado sólo se realizó desde el punto de vista electromagnético. No obstante, el comportamiento térmico de los motores de inducción al operar ante tensiones desbalanceadas influye en las pérdidas y la eficiencia del motor. Un trabajo futuro es, entonces, el determinar los impactos de la alimentación con tensiones desbalanceadas en las pérdidas y la eficiencia en motores de inducción usando el método de los elementos finitos y analizando el problema térmico-magnético de forma acoplada. Esto no es una tarea sencilla, ya que en los problemas acoplados electromagnéticos-térmicos la interacción de los campos electromagnéticos y los térmicos generalmente tienen diferentes escalas de tiempo.

Agradecimientos

Los autores quieren expresar su agradecimiento a la Universidad de la Salle, a la Universidad Católica de Lovaina y al Grupo Coimbra, por la financiación de la investigación.

Bibliografía

Belmans, R., Collard, B., Driesen, J., Evans, M-A, Honorio, L., Electricity for more efficiency: Electric technologies and their energy savings potential., Eurelectric & UIE: Brussels, 2004, pp. 121.

Belmans, R., Deprez, W., Gol, O., Increasing induction motor drives efficiency: understanding the pitfalls., Proceedings of Electrotechnical Institute, Vol. 223. 2005, pp. 7-25.

Bertoldi, P., Atanasio, B., Electricity Consumption and Efficiency Trends in the Enlarged European Union - Status report 2006., I.f.E.a. Sustainability, European Commission: Luxembourg, 2007, pp. 66.

Bianchi, N., Electrical machine analysis using finite elements., Boca Ratón: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2005, pp. 275.

Boldea, I., Nasar, S., Induction Machines Handbook., Boca Ratón: CRC Press, 2001, pp. 950

Chevalier, T., Kedous-Labouc, A., Cornut, B., Cester, C., Estimation of magnetic loss in an induction motor fed with sinusoidal supply using a finite element software and a new approach to dynamic hysteresis., IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 35 No. 5, 1999, pp. 3.

De Keulenaer, H., Panorama of EU-25 electricity use., 2007 [cited 2007 2007/07/02]; Available from: <http://www.leonardo-energy.org/drupal/node/1991>.

Dems, M., Komez, K., Wiak, S., Computation of rotor windings power losses in squirrel-cage induction motor., Complel - The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering, Vol. 14, No. 4, 1995, pp. 4.

Deprez, W., Dexters, A., Bastiaensen, C., Parasiliti, F., Belmans, R., Induction machine efficiency in motor and generator mode., EEMODS '07 Energy Efficiency in Motor Driven Systems, Beijing, 2007, pp. 9.

Deprez, W., Dexters, A., Stevens, S., Parasiliti, F., Belmans, R., The combined effect of practical operating conditions and material choice on the performance of induction machines., EEMODS '07 Energy Efficiency in Motor Driven Systems, Beijing, 2007, pp. 12.

Dexters, A., Deprez, W., Belmans, R., The effect of practical operation conditions on the performance of induction machines., 19th International Conference on Electricity Distribution - CIRED, Vienna, 2007, pp. 4.

Driesen, J., Coupled electromagnetic-thermal problems in electrical energy transducers., ESAT. PhD. Leuven: Katholieke Universiteit Leuven, 2000.

Eguiluz, L., Lara, P., Lavandero, J., Mañana, M., Performance Analysis of a three-phase induction motor under non-sinusoidal and unbalanced conditions., IEEE International Symposium on Diagnostic for electrical machines, power electronics and drives. Gijón, España, 1999, pp. 5.

Faiz, J., Ebrahimpour, H., Pillay, P., Influence of unbalanced voltage on steady-state performance of a three-phase squirrel-cage induction motor., IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 19, No. 4, 2004, pp. 6.

Faiz, J., Ebrahimpour, H., Pillay, P., Influence of unbalanced voltage supply on efficiency of three phase squirrel cage induction motor and economic analysis., Energy Conversion and Management, Vol. 47, No. 3, 2006, pp. 14.

Fernandez, X., Coimbra, A., Pinto, J., Antunes, C., Donsion, M., Thermal analysis of an induction motor fed by unbalanced power supply using a combined finite element-symmetrical components formulation., Proceedings International Conference on Power System Technology, Beiji, IEEE, 1998, pp. 260-264.

- Hameyer, K., Belmans, R., Numerical modeling and design of electrical machines and devices., Southampton: Computational mechanics publications, 1998, pp. 305.
- Hameyer, K., Mertens, R., Pahner, U., Belmans, R., New technique to enhance the accuracy of 2-D/3-D field quantities and forces obtained by standard finite-element solutions., IEE Proceedings Sci. Meas. Technol., Vol. 145, No. 2, 1998, pp. 9.
- Jiang, F., Bo, Z., Li, R., Performance of Induction Generator in Parallel with an Unbalanced Three-Phase System., Fourth International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management, Hong Kong, 1998. pp. 1193-1197.
- Kersting, W., Causes and effects of unbalanced voltages serving an induction motor., IEEE Transactions on Industry Applications Vol. 37, No. 1, 2001, pp. 6.
- Lee, C., Chen, B., Lee, W., Hsu, Y., Effects of various unbalanced voltages on the operation performance of an induction motor under the same voltage unbalance factor condition., Electric Power Systems Research, Vol. 47 No. 3, 1998, pp. 11.
- Litman, T., Efficient Electric motor systems Handbook., Oklahoma: The Fairmont Press Inc., 1995, pp. 320.
- Mantilla, L., An analytical and graphical study of the symmetrical components in an induction motor supply in relation to the voltage unbalance parameters., Electrical Engineering, Vol. 89 No. 7, 2007, pp. 11.
- Mertens, E., Motors and Variable Speed Drives, in Power Quality & Utilization Guide., Section 7: Energy Efficiency, L. Energy Editor, 2007, Leonardo Energy. pp. 11.
- Muravlev, O., Muravleva, O., Vekhter, E., Energetic parameters of induction motors as the basis of energy saving in a variable speed., Electrical Power Quality and Utilisation Journal, Vol. 11, No. 2, 2005, pp. 8.
- Pillay, P., Hofmann, P., Manyage, M., Derating of induction motors operating with a combination of unbalanced voltages and over or undervoltages., IEEE Transaction on Energy Conversion, Vol. 17, No. 4, 2002, pp. 7.
- Sadiku, M. N., Numerical techniques in Electromagnetics., 2nd ed. Boca Ratón: CRC, 2000, pp. 760.
- Slaets, B., Van Roy, P., Belmans, R., Energy efficiency of induction machines. International Conference on Electrical Machines-ICEM Finland, 2000, pp. 1503-1506.
- Wallace, A., von Jouanne, A., Andrews, P., Wohlgemuth, C., Wainwright, G., The effects of voltage and winding abnormalities on the measured performance of induction motors., IEEE Annual Meeting Industry Applications Conference, New Orleans, IEEE, 1997, pp. 196 - 200
- Wang, Y., Analysis of effects of three-phase voltage unbalance on induction motors with emphasis on the angle of the complex voltage unbalance factor., IEEE Transaction on Energy Conversion, Vol. 16, No. 3, 2001, pp. 270 – 275.
- Yamazaki, K., Efficiency analysis of induction motors for ammonia compressors considering stray load losses caused by stator and rotor slot ripple., IEEE Thirty-Sixth IAS Annual Meeting Industry Applications Conference, Chicago, IEEE, 2001, pp. 762 – 769.
- Yamazaki, K., Haruishi, Y., Stray load loss analysis of induction motor comparison of measurement due to IEEE standard 112 and direct calculation by finite element method., IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 40, No. 2, 2004, pp. 543-549
- Yamazaki, K., Shinfuku, S., Combined 3-D-2-D finite element analysis of induction motors considering variation of neutral point potential in star connection., IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 37 No. 5, 2001, pp. 3706–3710.