

ANÁLISIS GENERALIZADO DE LOS MOTORES ASINCRÓNICOS MEDIANTE LA TEORÍA DE LOS CAMPOS ROTATORIOS

Marcos A. de Armas Teyra & Julio R. Gómez Sarduy

Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente. Universidad de Cienfuegos, Cuba.

marmas@ucf.edu.cu; jgomez@ucf.edu.cu

Recibido para evaluación: 21 de Diciembre de 2007

Aceptación: 16 de Junio de 2008

Entrega de versión final: 10 de Julio de 2008

Resumen

El presente artículo, a partir de la teoría de los campos magnéticos rotatorios, desarrolla un modelo generalizado aplicable al comportamiento de un motor trifásico alimentado con tensiones sinusoidales; desequilibradas o no. En él se expone un circuito equivalente diferente y expresiones para determinar la potencia desarrollada y la demanda en cada una de las fases, en función de la tensión real aplicada y el deslizamiento. El modelo puede aplicarse a casos asimétricos constructivos e incluso a máquinas monofásicas de ello su carácter general. Conocidos las resistencias e inductancias de secuencia positiva y negativa de las máquinas, las expresiones que se obtienen son de fácil aplicación en un ambiente industrial. Las ecuaciones desarrolladas permiten determinar la potencia que debe suministrar el sistema debido al desequilibrio, si se desea el cálculo de los costos, el comportamiento de las corrientes y el "derating" que debe ser aplicado. Todas estas cuestiones son de interés en el ejercicio de la ingeniería en un ambiente industrial. Las ecuaciones que describen el modelo del motor son validadas con un estudio de caso.

Palabras Clave: Máquinas asincrónicas, régimen asimétrico, campos rotatorios.

Abstract

This paper present a new simple and precise generalized induction motor model based on the rotating magnetic field theory useful for machine evaluation in field condition. This model can be used to calculate efficiency, total and phase developed power, general behaviour, derating and motor impact in symmetrical or asymmetrical power systems. A new equivalent circuit and expressions are presented. The first part review the problems associated with asymmetrical power system. The second is dedicated to develop the motor model and an expression to calculate how much additional demand and energy consumption due to asymmetry is supplied by the power systems. Finally conclusions and an industrial motor study case are presented.

Keywords: Induction motor, generalized model, rotating field theory.

1. INTRODUCCIÓN

El análisis de los motores asincrónicos aún después de más un siglo de investigar sobre el tema, continúa siendo un asunto de interés debido a tres razones fundamentales; en primer lugar, las máquinas asincrónicas consumen a nivel mundial algo más del 50 % de la energía eléctrica de uso final y constituyen la mayoría de la carga instalada en los sistemas eléctricos industriales. En segundo orden, diversos estudios de calidad de la energía señalan el desequilibrio de tensión como uno de los problemas más frecuentes encontrados en los sistemas de potencia relativamente débiles, con transposición incompleta, cargas monofásicas, transformadores en conexión abierta, defectos en empalmes uniones y puentes, etc. Y, en tercer orden, la mayoría de los análisis presentados en la literatura científica, son estudios de laboratorio fundamentados en la teoría clásica de las componentes simétricas donde no se muestra directamente un comportamiento individual desacoplado para cada una de las fases que facilite la simulación y el análisis de flujos de potencia en sistemas asimétricos.

Por estas razones, es importante que se presente un modelo matemático de estado estable físicamente explícito que constituya una herramienta útil, precisa y sencilla de aplicar en condiciones reales de explotación y a la vez refleje con mayor claridad física el comportamiento de la máquina y permita determinar además de la eficiencia y el comportamiento general de la máquina, el impacto sobre el sistema y los costos asociados a este régimen.

Como se sabe, el desequilibrio de tensión afecta a la máquina asincrónica al incrementar las pérdidas en el estator y rotor, el calentamiento, las vibraciones, el ruido y, distorsionar el consumo de potencia activa y reactiva y el factor de potencia. También reduce la eficiencia, la potencia efectiva que puede desarrollar, y, en condiciones habituales de campo, el período de vida útil. Este problema es agravado por el hecho de que un pequeño desequilibrio de tensión proporciona un desequilibrio de corriente de cinco a diez veces superior en las corrientes de fase y de línea, dependiendo, fundamentalmente, del tipo de desequilibrio y de las impedancias expresadas en función del deslizamiento y en consecuencia de la naturaleza de la carga sin considerar la influencia que las características del sistema puedan ejercer. El desequilibrio de corriente además de dificultar la

protección adecuada de la máquina, decide el calentamiento, la distribución geométrica de las pérdidas, la localización del punto más caliente, los complicados flujos de calor que tienen lugar y determina la potencia que puede desarrollar, el comportamiento de la máquina y el grado y tipo de desequilibrio de tensión que se puede permitir en un sistema.

Si bien la mayoría de los estudios realizados en régimen desequilibrado se han efectuado en laboratorios especializados y están dirigidos al diseño, operación y al estimado del ciclo de vida de la máquina, no ha sido así en condiciones de campo ni se enfatiza en el uso eficiente de la energía, la demanda al sistema y los costos que deterioran la competitividad empresarial. Como determinar el exceso de demanda debido al desequilibrio se expone en el presente trabajo.

Por otra parte, la mayoría de los análisis presentados en la literatura se fundamentan en la teoría clásica de las componentes simétricas utilizando el criterio de desequilibrio de la NEMA, la IEEE o factores de desequilibrio de tensión y corriente complejos, aplicados a los circuitos equivalentes de secuencias positiva y negativa. Algunos no consideran la variación de los parámetros con el orden de secuencia o no describen las funciones analíticas o empíricas que sustentan estos cambios. [8,9]. Otros concluyen reconociendo la complejidad al determinar la variación de la potencia del motor en función de las impedancias, tensión, corrientes, deslizamiento y tipo de desequilibrio, proponiendo determinadas ecuaciones para calcular, aplicando factores complejos, reales o mediante modelos aproximados, el comportamiento del motor en condiciones de tensiones sinusoidales asimétricas.

El presente artículo, a partir de la teoría de los campos rotatorios muestra los aspectos físicos del comportamiento de una máquina eléctrica en régimen desequilibrado. En él se exponen expresiones para determinar la potencia desarrollada en cada una de las fases, las pérdidas, la demanda, en función del desequilibrio de corriente, de tensión y el deslizamiento de fácil aplicación en condiciones reales de explotación en un ambiente industrial. Si se desea, puede determinarse la eficiencia y las pérdidas más complejas. Estas expresiones calculan la potencia que debe suministrar el sistema debido al grado de desequilibrio y permite un cálculo más preciso de los costos y el "derating" que debe ser aplicado. Las expresiones generalizadas permiten el análisis en

caso de falta de una de las fases de alimentación o de máquinas monofásicas si son particularizadas.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

La norma IEEE Std 112 - 2004 establece que durante los ensayos de los motores asincrónicos, el desequilibrio de tensión no debe ser superior a un 0.5%. La Comisión Electrotécnica Internacional; IEC, plantea que los motores deben ser capaces de operar por un largo período de tiempo con un desequilibrio de un 1 % o por un corto período de tiempo que no exceda varios minutos con un desequilibrio de un 1.5 %. La NEMA establece una depreciación de los motores en función del desequilibrio y define el % de desequilibrio como:

$$\% D_{LÍNEA} = \frac{\text{Max} [|V_{AB} - V_{PROM}|; |V_{BC} - V_{PROM}|; |V_{CA} - V_{PROM}|]}{V_{PROM}}$$

$$V_{PROM} = \frac{V_{AB} + V_{BC} + V_{CA}}{3}$$

La IEEE Std 141-1993 en términos de fase establece:

$$\% D_{FASE} = \frac{\text{Max} [|V_A - V_{PROM}|; |V_B - V_{PROM}|; |V_C - V_{PROM}|]}{V_{PROM}}$$

$$V_{PROM} = \frac{V_A + V_B + V_C}{3}$$

En otras normas europeas, el desequilibrio de los sistemas trifásicos de tensión se caracteriza por la magnitud del tensión de secuencia negativa expresada en % del tensión nominal de fase y debe ser inferior al 2 %. También se define el factor de desequilibrio de tensión FDV como la relación en por ciento del módulo del tensión de secuencia negativo entre el módulo del tensión de secuencia positiva:

$$FDV = \left| \frac{V_n}{V_p} \right| * 100\%$$

Otros investigadores han desarrollado un concepto más generalizado de factor de desequilibrio de tensión complejo dado por la relación de los valores complejos de las tensiones de secuencia negativa y positiva: [9]

$$FDVC = \frac{V_n \angle \varphi_n}{V_p \angle \varphi_p} = k_v \angle \theta_v$$

Generalmente estos valores se determinan a partir de las tensiones de secuencia de línea:

$$\begin{bmatrix} V_{AB0} \\ V_{ABP} \\ V_{ABN} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} V_{AB} \\ V_{BC} \\ V_{CA} \end{bmatrix}$$

En las máquinas conectadas en estrella, las tensiones a neutro de secuencia están dados por:

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_p \\ V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{AN0} \\ V_{AN1} \\ V_{AN2} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} * \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 \angle -30 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \angle 30 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} V_{AB0} \\ V_{AB1} \\ V_{AB2} \end{bmatrix}$$

La teoría clásica de componentes simétricas se fundamenta en aplicar estas ecuaciones a un sistema desequilibrado de tensiones y así obtener sus componentes de secuencia positiva, negativa y cero.

En ellas a y a^2 rotan en el espacio los vectores

afectados en $\frac{2\pi}{3}$ y $\frac{4\pi}{3}$ grados.

La limitación para aplicar esta teoría a una máquina eléctrica real desequilibrada tanto por condiciones de tensión como por problemas del sistema o desplazamientos angulares asimétricos entre sus devanados de forma simultánea, radica en que en estos casos, las impedancias son diferentes y el operador espacial que refiere los fenómenos de una fase a otra toma valores arbitrarios β y λ diferentes a a y a^2 y las componentes de secuencia positiva y negativa de las corrientes, siendo incluso simétricos y balanceados las tensiones, poseen una relación diferente a la dada por la teoría clásica.

2.1 Teoría Generalizada

El procedimiento más generalizado para desarrollar ecuaciones que resuelvan estas dificultades se fundamenta en la teoría de los campos rotatorios según la cual un campo estacionario en el espacio y pulsante en el tiempo puede ser descompuesto en dos campos rotatorios de igual magnitud que rotan en sentidos opuestos, uno de los cuales, el que rota en el mismo sentido del rotor, se denomina campo de secuencia positiva y el otro, que gira en sentido opuesto, se le llama campo de secuencia negativa. Cada uno de los vectores de inducción de estos campos induce en sus propios devanados y en los devanados vecinos fuerzas electromotrices de secuencia positiva y negativa.

A partir de este razonamiento se puede plantear la

ecuación (1) que se generaliza aún más y permite analizar máquinas constructivamente asimétricas e incluso monofásicas si se consideran diferentes relaciones de vueltas y calibres en los conductores de las fases. [12,13 .

$$\begin{aligned} V_a &= I_a Z_{1a} + E_{apa} + E_{ana} + E_{apb} + E_{anb} + E_{apc} + E_{anc} \\ V_b &= I_b Z_{1b} + E_{bpb} + E_{bnb} + E_{bpa} + E_{bna} + E_{bpc} + E_{bnc} \\ V_c &= I_c Z_{1c} + E_{cpc} + E_{cnc} + E_{cpb} + E_{cnb} + E_{cpa} + E_{cna} \end{aligned} \quad (1)$$

La ecuación (1) puede expresarse como:

$$\begin{aligned} V_a &= I_a Z_{1a} + I_p Z_p + I_n Z_n \\ V_b &= I_b Z_{1b} + I_p Z_p e^{-j\beta} + I_n Z_n e^{j\beta} \\ V_c &= I_c Z_{1c} + I_p Z_p e^{-j\lambda} + I_n Z_n e^{j\lambda} \end{aligned} \quad (2)$$

Donde:

$$\begin{aligned} I_p &= I_a + I_b e^{j\beta} + I_c e^{j\lambda} \\ I_n &= I_a + I_b e^{-j\beta} + I_c e^{-j\lambda} \\ Z_{1a} &= r_{1a} + jX_{1a} \\ Z_{1b} &= r_{1b} + jX_{1b} \\ Z_{1c} &= r_{1c} + jX_{1c} \\ Z_m &= r_m + jX_m \\ Z_p &= \frac{1}{3} * (Z_m // Z_{2p}) \\ Z_n &= \frac{1}{3} * (Z_m // Z_{2n}) \end{aligned} \quad (3)$$

I_p e I_n Son las corrientes equivalentes que inducen las fuerzas electromotrices de secuencia positiva y negativa en las fases.

Z_p y Z_n son la impedancia de magnetización; Z_m , en paralelo con las impedancias correspondientes de secuencia positiva y negativa del rotor; Z_{2p} y Z_{2n} .

r_{1a} , r_{1b} , r_{1c} y X_{1a} , X_{1b} , X_{1c} son las resistencias y reactancias de dispersión de las fases del estator.

r_m y X_m son las resistencia y reactancia de la rama de magnetización y β y λ representan el desplazamiento espacial entre los devanados.

La expresión (2) define, de acuerdo con la teoría de los

campos el circuito equivalente mostrado en la Figura 1.

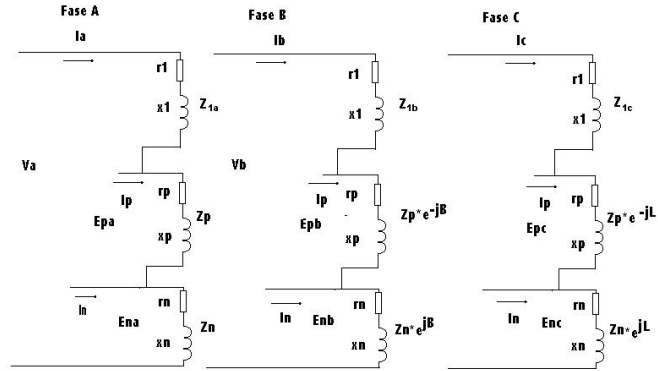


Figura 1 Circuito equivalente de las fases

La ecuación (2) de forma más útil y simplificada puede plantearse como:

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} = [M] * \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} \quad (4)$$

De donde finalmente para las corrientes se obtiene:

$$\begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} = [M]^{-1} * \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} \quad (5)$$

A partir de la ecuación (5) y conociendo la matriz [M], se determinan los valores de las corrientes que circulan por las fases de una máquina en cualquier estado de desequilibrio de tensión; exista o no y sea éste en magnitud o en ángulo. A la vez define circuitos equivalentes independientes para cada una de las fases que pueden ser utilizados en estudios de flujo de potencia en sistemas asimétricos.

2.2 Potencia en régimen desequilibrado

La potencia aparente desarrollada por cada una de las fases se determina según la expresión:

$$\begin{aligned} V_a I_a^* &= I_a^2 Z_{1a} + I_a^* I_p Z_p + I_a^* I_n Z_n \\ V_b I_b^* &= I_b^2 Z_{1b} + I_b^* I_p Z_p e^{-j\beta} + I_b^* I_n Z_n e^{j\beta} \\ V_c I_c^* &= I_c^2 Z_{1c} + I_c^* I_p Z_p e^{-j\lambda} + I_c^* I_n Z_n e^{j\lambda} \end{aligned} \quad (6)$$

En forma simplificada:

$$S_T = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}^T * \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}^* \quad (7)$$

Donde por conjugada de la corriente se comprende la conjugada de cada uno de los términos de la matriz de corriente.

2.3 Máquinas trifásicas ordinarias

A partir de este momento y sólo con la intención de simplificar y aplicar a un caso común, se particulariza en las máquinas trifásicas comerciales simétricas diseñadas con devanados desplazados ángulos espaciales

$$\beta = a = \frac{2\pi}{3} \text{ y } \lambda = a^2 = \frac{4\pi}{3}. \text{ Para este caso}$$

$$M_{11} = M_{22} = M_{33} = Z_1 + Z_p + Z_n$$

$$M_{12} = M_{23} = M_{31} = Z_p * e^{j120} + Z_n * e^{-j120}$$

$$M_{13} = M_{21} = M_{32} = Z_p * e^{-j120} + Z_n * e^{j120}$$

$$Z_{1a} = Z_{1b} = Z_{1c} = Z_1 = r_1 + jX_1$$

Por otra parte, si se conocen las tensiones y corrientes de secuencia positiva y negativa directamente de las mediciones de campo efectuadas con un analizador de redes o dadas las tensiones y corrientes y la aplicación de Pitágoras generalizado, es posible establecer los coeficientes complejos de tensión y corrientes siguientes:

$$\begin{aligned} \vec{k}_v &= \frac{V_n \angle \vartheta_n}{V_p \angle \vartheta_p} = k_v \angle \vartheta_v \\ \vec{k}_i &= \frac{I_n \angle \vartheta_{ia2}}{I_p \angle \vartheta_{ia1}} = k_i \angle \vartheta_i \end{aligned} \quad (8)$$

En este caso la potencia compleja total de la máquina trifásica está dada por:

$$S_T = V_a I_a^* + V_b I_b^* + V_c I_c^* = 3 \times (V_p I_p^* + V_n I_n^*) \quad (9)$$

Sustituyendo (8) en (9) se obtiene:

$$S_T = 3 \times V_p I_p^* (1 + \vec{k}_v k_i^*) \quad (10)$$

La ecuación (10) define la corriente equivalente en régimen asimétrico dada por:

$$I_{EQ}^* = I_p^* (1 + \vec{k}_v k_i^*) \quad (11)$$

De la ecuación (11) se infiere que existen dos componentes de potencia compleja; uno debido a la corriente de secuencia positiva I_p^* y otro debido a la asimetría del sistema dado por $I_p^* \vec{k}_v k_i^*$. Al primero

se asocia la potencia aparente $3 * V_p I_p^* = P + jQ$ y al segundo la potencia aparente de asimetría

$A = 3 * V_p I_p^* \vec{k}_v k_i^* = M + jN$. El factor $\vec{k}_v k_i^*$ en p.u. expresa el consumo de potencia compleja de asimetría. Esta potencia es suministrada al sistema desde la red de suministro y constituye una demanda que debe generarse y potencialmente puede sobrecargar un sistema de potencia que se encuentre desbalanceado. Resulta entonces evidente que con mediciones elementales de campo es posible conocer tanto la potencia aparente total como las componentes simétrica y asimétrica de la potencia compleja.

La potencia real y reactiva de entrada:

$$\begin{aligned} P_{in} &= \text{Re}[S_T] \\ Q_{in} &= \text{Im}[S_T] \end{aligned} \quad (12)$$

El factor de potencia se determina según:

$$FP = \frac{P_{in}}{S_T} \quad (13)$$

Como se observa en (2) las corrientes I_p e I_n crean campos magnéticos rotatorios de magnitud y frecuencia constante que giran en sentidos opuestos.

La ecuación (6) muestra que en las fases se desarrollan diferentes potencias aparente, activa y reactiva, independientemente de que las fuerzas electromotrices inducidas por las corrientes I_p e I_n sean simétricas y balanceadas. El calentamiento, como se conoce y confirman la ecuación (6), no se produce de forma uniforme en la geometría de la máquina desplazando el punto más caliente a la fase más cargada y estableciendo trayectorias adicionales de flujo térmico difíciles de determinar con exactitud. Esto produce esfuerzos electromagnéticos, dilatación y condiciones que facilitan el rozamiento y el deterioro de los devanados.

2.4 Efectos del campo de secuencia negativa

El campo de secuencia negativa posee seis efectos fundamentales:

- Se opone a parte de la tensión aplicada reduciendo su disponibilidad para producir campo de secuencia positiva.
- Absorbe parte del torque desarrollado por el campo de secuencia positiva reduciendo el momento en el eje.
- Produce vibraciones perjudiciales para la máquina del orden $2 * f_1$ debido su interacción con el campo de secuencia positivo.
- Distorsiona el campo magnético en el entrehierro
- Incrementa el calentamiento
- Reduce la vida útil del motor

Las magnitudes de las corrientes de las fases pueden expresarse en términos del coeficiente complejo de desequilibrio $k_i \angle \mathcal{G}_i$. En este caso:

$$\begin{aligned}
 I_a &= \frac{I_p}{3} \sqrt{1 + k_i^2 + 2k_i \cos \mathcal{G}_i} \\
 I_b &= \frac{I_p}{3} \sqrt{1 + k_i^2 + 2k_i \cos(\mathcal{G}_i - 120)} \\
 I_c &= \frac{I_p}{3} \sqrt{1 + k_i^2 + 2k_i \cos(\mathcal{G}_i + 120)}
 \end{aligned}
 \tag{14}$$

El valor máximo que puede alcanzar la corriente en una de las fases se obtiene cuando $\mathcal{G}_i = 0$ en la fase A o ± 120 en las fases B y C y está dado por:

$$I_{MAX} = \frac{I_p}{3} * (1 + k_i)
 \tag{17}$$

El límite permisible de desequilibrio puede establecerse, con cierta aproximación, considerando que el efecto más perjudicial sobre la máquina lo ejerce la magnitud de la corriente por el devanado del estator y se alcanza cuando en la fase más cargada circula la corriente nominal. Este cálculo es iterativo dada la dependencia de las corrientes de la impedancia, tipo de carga, el deslizamiento y el grado y tipo de desequilibrio de tensión. A partir de esta corriente se determina el "derating" real y los demás parámetros operacionales de la máquina.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Estudio de Caso. Comprobación experimental

Para validar el modelo se elaboró un programa en MATLAB aplicado a un motor que acciona una bomba centrífuga en un escenario de la industria azucarera cubana. Los datos de chapa son: P = 45 kW, 440 V, 71 A, 1770 rpm, $\cos\phi$ 0,89 y eficiencia 93%. La condición de desequilibrio y la velocidad son: Vab = 436 V, Vbc = 430 V, Vca = 407 V, n = 1780 rpm. Los resultados se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Comprobación Experimental.

r_1	x_1	r_m	x_m	r_2	x_2	r_{22}	x_{22}
0.146	0.96	6.183	49.13	0.152	2.206	0.404	0.036
Validación del Modelo							
	Ia	Ib	Ic	Pin	Fp	St	
Experimental	73.6	76.8	27.81	37.4	0.85	44.00	
Teórica	73.57	76.45	27.8	37.3	0.88	42.15	
% Error	0.04	0.45	0.035	0.26	3.5	4.33	

Como puede verse, el error en las corrientes y la potencia real demandada, es mínimo y dentro de los límites que pueden considerarse aceptables en el factor de potencia y en la potencia aparente.

Los factores de desbalance para este caso son:

$$\begin{aligned}
 \vec{k}_v &= \frac{V_n \angle \mathcal{G}_n}{V_p \angle \mathcal{G}_p} = 0.0413 \angle 48.3 \\
 \vec{k}_i &= \frac{I_n \angle \mathcal{G}_{ia2}}{I_p \angle \mathcal{G}_{ia1}} = 0.5117 \angle 4.87
 \end{aligned}$$

La potencia compleja de secuencia positiva:

$$S_p = 3 * V_p I_p^* = 40.769 - 7.840$$

Y la potencia compleja de asimetría:

$$A = 3 * V_p I_p^* \vec{k}_v \vec{k}_i^* = 0.7397 + j0.473 = 0.87 \text{ kVA}$$

La potencia compleja total

$$S = S_p + A = 41.5 - j7.36 = 42.15 \text{ kVA}$$

La potencia de asimetría debe ser suministrada desde la red y por supuesto facturada al usuario. Su origen es la ineficiencia del sistema debido al desbalance.

4. CONCLUSIONES

1. La teoría de los campos rotatorios proporciona un modelo sencillo y explícito de los sucesos físicos que se desarrollan en una máquina asincrónica.
2. Las ecuaciones obtenidas son de fácil manejo y aplicables para describir el comportamiento de la máquina en condiciones de campo independientemente del tipo de desequilibrio o alimentación que se presente. Los resultados han sido validados con varios estudios de caso uno de los cuales se expone en el presente trabajo
3. Las ecuaciones de potencia en términos de los coeficientes complejos de desequilibrio de tensión y corriente permiten analizar con mediciones elementales, la potencia de asimetría, activa, reactiva y el factor de potencia de un motor en condiciones industriales

- IEEE Transaction on Industry Applications Vol 33, No 3.
9. Zerquera I., M. y Karel, F. P., 1997. Algoritmo para determinar el comportamiento de las máquinas de inducción a partir de ecuaciones generalizadas. Memorias SIE.
 10. Zerquera I., Mariano., 1992. Motores de Inducción Monofásicos y Bifásicos. La Habana, Cuba. 375 P.

BIBLIOGRAFÍA

1. Costa M. Angel, López, Xosé M., 2004. Effects of Unbalanced Power Supply on Efficient Performance of Three Phase Induction Motors. Proceedings of XL International Symposium of Electrical Machines SME, June Hojnowka, Poland. pp. 15 - 18.
2. Chin - Yin L., 1999. Effects of Unbalanced Voltage on Operation Performance of a Three Phase Induction Motor. IEEE Transaction on Energy Conversion , Vol 14, No. 2.
3. De Armas Teyra M. A., 2004. Impacto de la Calidad de la energía en los sistemas Eléctricos de Potencia . Curso de Post Grado Instituto de Ingeniería UABC, Enero, Mexicali, México.
4. Fitzgerald, K. y Uman, D. s.a. Electric Machines Mc Graw Hill 688 P.
5. Seung - Gi J., 2002. Representing Line Tensión Unbalance. IEEE.
6. Yaw - Juen W., 2001. 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.
7. Ivanov S.,1983. Máquinas Eléctricas T II. Editorial MIR, Moscú. pp. 115 - 118.
8. Kersting, W. H., 1997. Phase Frame Analysis of the Effects of Voltage Unbalance on Induction Machines.

