

Efectos del Desbalance y los Armónicos de Voltaje en la Operación de los Motores de Inducción

Enrique Ciro Quispe Oqueña

Grupo de Investigación en Energías GIEN-UAO, Departamento de Energética y Mecánica
Universidad Autónoma de Occidente
Campus Valle del Lili, Calle 25 No.115-85, Km.2 vía a Jamundí, Cali, Colombia.
Telf: (572) 3188000 ext 11856, Fax. (572) 5553911,
ecquispe@cua.edu.co

Resumen. Este artículo analiza los efectos que se producen en la operación del motor de inducción cuando es alimentado con un voltaje trifásico desbalanceado y con una forma de onda distorsionada, es decir con contenido de armónicos. El propósito es mostrar que una pobre calidad de potencia eléctrica tiene efectos negativos sobre el funcionamiento del motor, específicamente en los siguientes parámetros: pérdidas, elevación de temperatura, potencia nominal, eficiencia, ruido magnético y confiabilidad. Finalmente se presenta recomendaciones que permiten aumentar la confiabilidad de la operación del motor cuando esta sometido a estas condiciones.

Palabras Clave

Motor de Inducción, desbalance, Armónicos, Voltaje, Características de Funcionamiento.

1. Introducción

Los sistemas accionados con motores eléctricos usan las dos terceras partes de la energía eléctrica empleada en el sector industrial. Por otro lado el énfasis actual por incrementar la eficiencia en los procesos industriales ha aumentado uso de equipos electrónicos como los accionamientos eléctricos de frecuencia variable, de motores de alta eficiencia y de condensadores para mejorar el factor de potencia. Todo esto ha resultado en un decremento de la calidad de la potencia en el sistema eléctrico. Siendo el motor de inducción el de mayor uso industrial, es muy importante realizar estudios encaminados a estudiar los efectos de la calidad de potencia eléctrica sobre la eficiencia y la confiabilidad de los motores trifásicos de inducción.

Este artículo analiza los efectos que se producen en la operación del motor de inducción cuando es alimentado con un voltaje trifásico desbalanceado y con una forma de onda distorsionada, presentándose los efectos que estos ejercen sobre la eficiencia y otras características de operación. El propósito es mostrar que una pobre calidad de potencia eléctrica tiene efectos negativos sobre el funcionamiento del motor: pérdidas, elevación de

temperatura, potencia nominal, eficiencia, ruido magnético y confiabilidad. Finalmente se presenta recomendaciones que permiten aumentar la confiabilidad de la operación del motor cuando esta sometido a estas condiciones.

2. Influencia del Desbalance de Voltaje

Cuando los voltajes de línea que alimentan al motor trifásico no son balanceados se originara un desbalance en la corriente del bobinado estático. El efecto de los voltajes desbalanceados sobre el motor de inducción es equivalente a introducir un “voltaje de secuencia negativa” que gira en sentido opuesto al que giraría si el voltaje fuera balanceado. Este voltaje de secuencia-negativa produce un flujo giratorio en el entrehierro en sentido contrario a la rotación del rotor, induciendo altas corrientes en el rotor. Cada conjunto de voltajes de secuencia positiva y negativa produce un conjunto balanceado de corrientes en el motor de inducción y la resultante de los dos conjuntos de corriente representa la corriente real producida en el estator trifásico alimentado por el voltaje desbalanceado real.

El comportamiento del motor con el voltaje de secuencia positiva es esencialmente el mismo que resultaría si el voltaje de alimentación fuera balanceado. El voltaje de secuencia negativa sin embargo crea un campo giratorio contrario, de tal forma que si el deslizamiento respecto al campo de secuencia positiva es s , el deslizamiento al campo de secuencia negativa será $(2-s)$. El circuito equivalente del motor de inducción para la secuencia positiva y negativa es presentado por muchos autores [7], [13]. El motor se comporta como si fuera la resultante de dos motores separados, uno de ellos girando a un deslizamiento s y alimentado con el voltaje de secuencia negativa y el otro girando a un deslizamiento $(2-s)$ y alimentado con el voltaje de secuencia negativa. Con este modelo es fácil observar que el flujo de secuencia negativa esta girando respecto al rotor a una velocidad que es aproximadamente dos veces la velocidad sincrónica, por lo tanto las pérdidas en el núcleo del motor se incrementan significativamente. Usando la

metodología del circuito equivalente se puede explicar porque el torque del motor disminuye. El torque calculado a partir del circuito de secuencia positiva da el torque del motor cuando opera con un voltaje balanceado. El campo giratorio producido por el voltaje de secuencia negativa produce un torque negativo. La magnitud del torque de secuencia negativa no es despreciable, por lo tanto el torque neto en el eje del motor será algo menor que el producido por el voltaje balanceado.

A. Definición de Desbalance de Voltaje

La definición de desbalance de voltaje usada por la comunidad académica es la relación del voltaje de secuencia negativa V_{ab2} al voltaje de secuencia positiva V_{ab1} .

$$\% \text{ desbalance voltaje} = \frac{V_{ab2}}{V_{ab1}} * 100 \quad (1)$$

Esta definición es adoptada por la Norma IEC 60034-26, [8].

Para un conjunto de voltajes desbalanceados V_{ab}, V_{bc}, V_{ca} , el voltaje de secuencia positiva V_{ab1} y el de secuencia negativa V_{ab2} esta dado por:

$$V_{ab1} = \frac{V_{ab} + a * V_{bc} + a^2 * V_{ca}}{3}$$

$$V_{ab2} = \frac{V_{ab} + a^2 * V_{bc} + a * V_{ca}}{3}$$

donde:

$$a = -0.5 + j0.866 \quad \text{y} \quad a^2 = -0.5 - j0.866$$

Sin embargo la Norma NEMA MG1.1993 y el IEEE usan la siguiente definición:

$$\% \text{ desbalance} = \frac{\text{max ima desviación de voltaje}}{\text{respecto al voltaje promedio}} * 100 \quad (2)$$

$$\text{voltaje promedio}$$

La definición usada por NEMA evita el uso del álgebra compleja. Sin embargo al aplicar ambas definiciones se obtienen resultados diferentes.

A modo de ejemplo, apliquemos estas definiciones para un sistema de voltajes desbalanceado:

$$V_{ab} = 450 \angle 0^\circ, V_{bc} = 363.6 \angle -121.44^\circ, V_{ca} = 405 \angle 130^\circ$$

Calculando las componentes de secuencia de voltaje, el voltaje de secuencia positiva V_{ab1} será $404.625 \angle 2.89^\circ$, y

el voltaje de secuencia negativa V_{ab2} será $50.217 \angle -23.98^\circ$.

Entonces usando la definición de la IEC, ecuación (1), el % de desbalance es:

$$\% \text{ desbalance voltaje} = \frac{50.217}{404.625} * 100 = 12.41\%$$

Pero si se usa la definición NEMA, ecuación (2), el voltaje promedio será 406.2 y la desviación máxima de voltaje respecto al voltaje promedio es de $450 - 406.2 = 43.8$. Entonces el % de desbalance será de:

$$\% \text{ desbalance voltaje} = \frac{43.8}{406.2} * 100 = 10.78\%$$

Se observa que se obtienen diferentes resultados en el cálculo del desbalance cuando se usa una u otra definición. Un estudio realizado por Pillay [12] concluyo que no existen diferencias significativas si el desbalance esta dentro del rango del 5%.

B. Efectos sobre la Potencia Nominal

Experimentalmente se verifica que un pequeño porcentaje de desbalance de tensión causa un gran porcentaje de desbalance de corriente, entonces para un motor operando a una determinada carga su elevación de temperatura cuando es alimentado con un voltaje desbalanceado será mucho mayor comparada con el motor operando a la misma carga pero alimentado con un voltaje balanceado.

Cuando el voltaje es desbalanceado la potencia nominal del motor debe ser disminuida, para lo cual debe multiplicarse la potencia nominal del motor original por el factor mostrado en la figura 1, con el objetivo de disminuir la posibilidad de daño del motor. Hasta 1% de desbalance no existe problema, si el desbalance es de 2% el factor de reclasificación es de 0.96, si el desbalance es de 5% el factor de reclasificación será de 0.76. Puede verse que la operación del motor con un porcentaje de desbalance por encima de 5% no es recomendable.

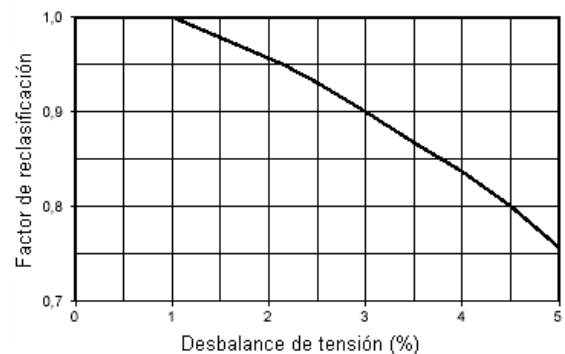


Fig. 1. Reclasificación de la potencia Nominal

C. Efecto sobre otras Características de Operación

Enunciaremos algunos efectos que se han verificado experimentalmente y pueden ser útiles para el ingeniero de mantenimiento.

- El torque de arranque y el torque máximo disminuyen cuando el voltaje es desbalanceado, por lo tanto si el desbalance de voltaje es severo es probable que el torque del motor ya no sea adecuado para la aplicación.
- La velocidad a plena carga disminuye levemente si el motor es alimentado con voltaje desbalanceado.
- La corriente de rotor bloqueado tendrá un desbalance similar al desbalance de tensión, pero los KVA de rotor bloqueado se incrementarían levemente.
- Cuando el motor esta operando con una carga normal, el porcentaje de desbalance de corrientes causado será aproximadamente de 6 a 10 veces el porcentaje del desbalance de voltaje.

3. Influencia de los Armónicos de Voltaje

Cuando la forma de onda de voltaje esta distorsionada entonces la onda de voltaje tendrá armónicos de voltaje. Los armónicos de voltaje en los terminales del motor originan armónicos de flujo dentro del motor. Los armónicos de flujo no contribuyen significativamente al torque del motor, pero rotan a una velocidad diferente a la velocidad sincrónica, por lo cual inducen una corriente de alta frecuencia en el rotor. Así los armónicos de voltaje influyen sobre las pérdidas, la elevación de temperatura, la potencia nominal, la eficiencia y el tiempo de vida de los rodamientos.

Por otro lado los armónicos de voltaje crean armónicos de corriente en los bobinados del motor y entonces se presentan los siguientes fenómenos:

- La velocidad del campo magnético giratorio, velocidad sincrónica, creado por el estator del motor es $(4\pi/p)f_1$, donde p es el número de polos y f_1 es la frecuencia nominal. Para un deslizamiento s , la velocidad del rotor es $(4\pi/p)f_1(1-s)$ y la frecuencia del rotor es sf_1 .
- Los armónicos de corriente del estator producen armónicos de f.m.m. y éstas inducen otros armónicos en el rotor en función de la velocidad. Un armónico de f.m.m en el rotor de orden n viaja a la velocidad $\pm(4\pi/p)sf_1/n$ respecto al rotor y viaja a la velocidad $(4\pi/p)f_1(1-s) \pm (4\pi/p)sf_1/n$ con respecto al estator. Este armónico induce una f.e.m. en el estator a una frecuencia igual a $f_1\{n-s(n\pm 1)\}$, el signo positivo indica que el armónico de f.m.m. del rotor viaja en dirección opuesta a la fundamental.

A. Definición del Factor Armónico de Voltaje (HVF).

El HVF (sus siglas vienen del ingles *Harmonic Voltage Factor*) se define por la ecuación:

$$HVF = \sqrt{\sum_{n=5}^{n=\infty} \frac{(V_n)^2}{n}} \quad (3)$$

Donde:

n = orden del armónico impar, no incluye aquellos divisibles entre tres.

V_n = valor en p.u. de la magnitud del armónico de voltaje de orden n th .

Esta es la definición dada por la Norma NEMA MG1 [12] y coincide con la definición de HFV dado por la Norma IEC [9].

Por ejemplo si el voltaje de línea tienen los siguientes armónicos de voltaje en p.u. : 0.10, 0.07, 0.045 y 0.036 para los armónicos de orden 5,7,11 y 13th respectivamente, el valor del HFV es:

$$HVF = \sqrt{\frac{0.1^2}{5} + \frac{0.07^2}{7} + \frac{0.045^2}{11} + \frac{0.036^2}{13}} = 0.0546$$

B. Efecto sobre la Elevación de Temperatura y la Potencia Nominal

El efecto de los armónicos en las pérdidas del motor pueden considerarse que afectan las pérdidas de fricción y ventilación, pérdidas en el cobre del estator y rotor, pérdidas en el hierro.

La inductancia de dispersión efectiva estatórica y rotórica disminuyen con la frecuencia, mientras la resistencia aumenta. La resistencia del rotor puede incrementarse de cuatro a seis veces su valor DC, mientras la reactancia de dispersión se puede reducir a una fracción de la reactancia de dispersión a frecuencia fundamental. Las pérdidas en el cobre del estator se incrementan en proporción al cuadrado de la corriente armónica total más un incremento adicional debido al efecto skin producido por las altas frecuencias. Los armónicos influyen mayormente en las pérdidas en el cobre del estator y el rotor y las pérdidas adicionales.

El incremento de las pérdidas contribuye a un incremento de la temperatura del motor , por lo tanto para evitar el sobrecalentamiento, la potencia nominal del motor debe ser reducida de tal forma que la temperatura del aislamiento no sobrepase su clase térmica.

De acuerdo a la Norma NEMA MG1.1993 Parte 30 [12], para reclasificar la potencia nominal del motor se debe de encontrar el factor de reclasificación (Derating Factor) DF en función del HVF , como se muestra en la Figura 2.

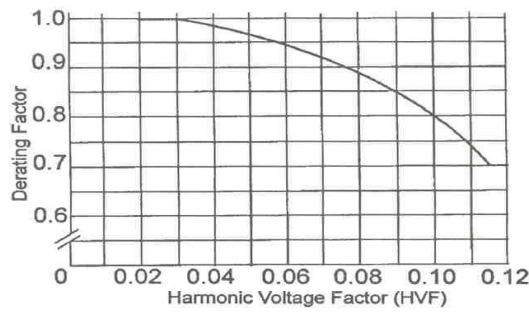


Fig. 2. Derating Factor DF en función del HVF

Si el voltaje aplicado al motor tiene un HVF igual al 3% no existe problema, si el HVF es de 5% el DF será de 0.97, mientras que si el HVF es de 11% el DF será de 0.75 entonces la potencia del motor se reducirá en 25%.

Por lo tanto no se recomienda operar el motor si la tensión tiene un HVF mayor a 5%. incremento de las pérdidas contribuye a un incremento de la temperatura del motor, por lo tanto para evitar el sobrecalentamiento, la potencia nominal del motor debe ser reducida de tal forma que la temperatura del aislamiento no sobrepase su clase térmica.

C. Efecto sobre la Eficiencia

La eficiencia del motor de inducción cuando opera alimentado con armónicos de voltaje se reduce debido al incremento de las pérdidas causadas por los armónicos de corriente presentes en el bobinado del motor. Para estimar la eficiencia en las nuevas condiciones puede usarse la siguiente ecuación, que esta en función del DF :

$$\eta_c = \frac{DF^2}{\frac{1}{\eta} + DF^2 - 1} \quad (4)$$

Donde:

η es la eficiencia del motor alimentado con tensión sinusoidal.

η_c es la eficiencia del motor cuando el voltaje aplicado tiene armónicos.

D. Efecto sobre los Rodamientos debido a las corrientes en los Rodamientos

Existen al menos tres mecanismos que generan corrientes en los rodamientos, cada mecanismo puede ocurrir dependiendo de las características eléctricas de los rodamientos. Los mecanismos son: corrientes en los rodamientos debido al efecto capacitivo que ocurre en el entrehierro y produce descargas, corrientes en los rodamientos debido a las tensiones dv/dt en los voltajes

bobina neutro, y corrientes circulantes en los rodamientos debido al flujo magnético resultante producido por las corrientes de secuencia cero. Los primeros dos mecanismos están directamente relacionados al voltaje respecto al neutro y aparecen cuando el motor es alimentado por Drives con tecnología PWM (Pulse Width Modulation). En este artículo solo explicaremos el tercer mecanismo.

Los armónicos de corriente de secuencia cero, $n = 0, 3, 6, 9, \dots$ etc, tienen una misma característica, ellos ingresan por los terminales del motor y están en fase en el tiempo. Entonces la suma de las corrientes en las tres fases no es nula y da como resultado la corriente de secuencia cero. Esta corriente de secuencia cero producirá un flujo neto alrededor del eje del motor e inducirá una f.e.m. en la trayectoria conductiva formada por el eje, los rodamientos y la carcasa del motor, como se muestra en la Figura 3. La f.e.m. es normalmente muy pequeña en el rango de los milivoltios, sin embargo cuando la impedancia de la trayectoria conductiva es suficientemente baja, una corriente circulante pasara a través de los rodamientos.

Un estudio realizado por Macdonald [4] muestra que si el voltaje en el eje excede los 300 mV se requiere colocar un rodamiento aislado para prevenir que la corriente circulante dañe los rodamientos. Normalmente este se coloca en lugar del rodamiento ubicado en el lado opuesto a la carga (ODE Opposite Drive End), porque si se coloca en el lado de carga (DE) la carga puede formar un camino eléctrico que complete el lazo y permita el flujo de corriente.

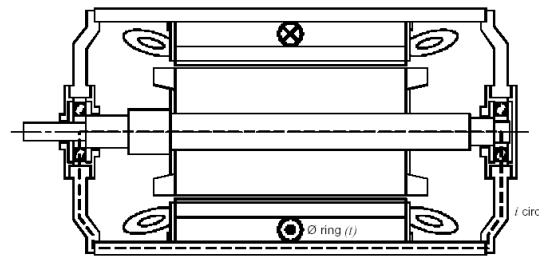


Fig. 3. Trayectoria de Circulación de las Corrientes en los Rodamientos debido al flujo concatenado creado por los Armónicos de Corriente de Secuencia Cero.

4. Conclusiones

Para reclasificar la potencia del motor debido al desbalance de voltaje, se recomienda aplicar la ecuación de la IEC para calcular el porcentaje de desbalance de voltaje, sobre todo si el desbalance es cercano al 5% o mayor.

No se recomienda la operación del motor con un desbalance de voltaje mayor al 2%. Si el porcentaje de desbalance es mayor al 2% la potencia debe ser reclasificada. Es muy peligroso que el motor opere con un desbalance de voltaje de 5% o mayor.

En la prueba de rotor bloqueado, si el rotor esta en buen estado, el desbalance de las corrientes será del mismo valor que el desbalance de voltajes.

No se recomienda la operación del motor si la tensión tiene un HFV mayor al 5%. Si el HFV es mayor a 5% la potencia del motor debe ser reclasificada. Es muy peligroso que el motor opere con un HFV mayor a 11%.

Si el voltaje inducido en el eje es mayor a 300 mV se requiere colocar un rodamiento aislado para evitar que las corrientes circulantes dañen el rodamiento. Se recomienda colocar el rodamiento aislado en el lado opuesto a la carga (ODE).

Agradecimiento

El autor desea expresar su agradecimiento a la Vicerrectoria de Investigaciones y Desarrollo Tecnológico de la Universidad Autónoma de Occidente, quien brindo el apoyo para la realización de este trabajo.

Referencias

- [1] A. Bonnett, "Quality and Reliability of Energy-Efficient Motors", IEEE Industry Applications Magazine, Vol.3, No.1, pp.22-31, January/February 1997.
- [2] B. Hugh, "Bearing Fluting", IEEE I.A. Magazine, Vol.8, No.5, pp 53-57, September/October 2002.
- [3] EPRI "Voltage Unbalance: Power Quality Issues, Related Standards and Mitigation Techniques" Final Report, June 2000, California, USA.
- [4] D. Macdonald and W. Gray, " PWM Drive Related Bearing Failures", IEEE Industry Applications Magazine, Vol. 5, No.4, pp. 41-47, July-August 1999.
- [5] E. Quispe, "Efecto de la Calidad de la Potencia Eléctrica en la Operación de los motores de Inducción", Memorias II Simposio Internacional sobre Calidad de Energía Eléctrica SICEL2003, Unidad Publicaciones, Facultad Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia, pp. 103-107, Noviembre 2003, Colombia.
- [6] E. Quispe, G González y J. Aguado " Influence of Unbalanced and Waveform Voltage on the Performance Characteristics of Three-phase Induction Motors", International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'04), April 2004, Barcelona, España.

[7] E. Quispe y J. Pretel "Modelo Matemático para el Análisis en Estado Estable del Motor de Inducción con Asimetrías en el Estator y Rotor", Revista El Hombre y la Máquina-CUAO, No. 13, pp. 87-97. Cali- Colombia, 1998.

[8] International Electrotechnical Commission, Rotating Electrical Machines : Part 17 (IEC 60034-17) Guide for Application of Cage Induction Motors when Fed from Converters, Geneva: IEC 2002, 35 p.

[9] International Electrotechnical Commission, Rotating Electrical Machines : Part 26 (IEC 60034-26) Effects of Unbalanced Voltages on the Performance of Induction Motors, Ginebra: IEC 2002, 15 p.

[10] J. Das, Power System Analysis : Short-Circuit Analysis and Harmonics , Marcel Dekker, Inc., New York (2002), pp.597- 603.

[11] J. Arrillaga, D. Bradley and P. Bodger, "Power System Harmonics", John Wiley & Sons, New York (1985), pp.103 – 116.

[12] NEMA, Standard Publications No. MG1-1993. Motors and Generators, Published by National Electrical Manufacturers Association, Washington (1993), Part 21 pp. 9 - 10 and Part 30 pp. 1- 2.

[13] P. Pillay, " Derating of Induction Motors Operating with a Combination of Unbalanced Voltages and Over or Undervoltages", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 17, No.4, pp. 485-491, December 2002.

[14] R. Dugan, Electrical Power System Quality, Mc Graw-Hill, New York, pp.2-7, 154- 155, 1996.

[15] S. Chen and T. Lipo, " Bearing Currents and Shaft Voltages of an Induction Motors Under Hard and Soft-Switching Inverter Excitation.", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 34, No.5, pp. 1042-1048, September/October 1998.