



APLICACIONES INDUSTRIALES

EFECTO DEL TIPO DE DESBALANCE SOBRE LA EFICIENCIA Y EL FACTOR DE POTENCIA DE LOS MOTORES ASINCRÓNICOS

Dr. Percy R. Viego Felipe

Dr. Juan B. Cogollos Martínez

RESUMEN

Operar los motores trifásicos asincrónicos con voltajes desbalanceados incrementa sensiblemente sus pérdidas y afecta el factor de potencia, con los consecuentes efectos sobre el sistema eléctrico. En este trabajo se precisa que ni el factor de desbalance de voltaje de línea - según definición de la NEMA (FDVL) -, ni el valor de los componentes de secuencia del voltaje, ni otros factores que se emplean para definir el desbalance, permiten por sí solos evaluar con precisión el efecto cuantitativo sobre la eficiencia y el factor de potencia. Se propone aquí una vía para lograr este objetivo en función de los componentes de secuencia del voltaje y del FDVL.

Palabras claves: motores asincrónicos, motores eléctricos, motores trifásicos.

SUMMARY

Operating three-phase induction motors under unbalanced voltage supply increases losses and affects the machine power factor, provoking the subsequent effects on the electric systems. In this paper is demonstrated that neither the line voltage unbalance rate – as defined by NEMA (FDVL) – nor the sequence voltages or other factors used for describing the unbalances, allow a precise quantification of the effect on efficiency and power factor. A way for achieving that objective as a function of the sequence voltages and the FDVL is proposed.

Key words: *induction motors, electric motors, three-phase motors.*

INTRODUCCIÓN

Entre las causas que provocan la disminución de la eficiencia energética en los sistemas eléctricos industriales y de servicio, se encuentran los desbalances de voltaje, los cuales se originan por distintas causas [1] [2]. Los desbalances de voltaje incrementan las pérdidas en estos sistemas, provocando sobrecargas y elevando los costos en electricidad, además de afectar el factor de potencia (incrementándolo o disminuyéndolo) y reducir la vida útil de los equipos. Unas de las causas que provocan estos perjuicios, es la afectación sobre los motores asincrónicos, que constituyen cargas de gran peso en todos los sistemas.

Entonces, poder evaluar cómo varían las pérdidas y el factor de potencia en los motores asincrónicos según la magnitud y tipo de desbalance, resulta un objetivo importante para poder contar con herramientas que permitan elevar la eficiencia de los sistemas de suministro eléctrico.

En este trabajo se manejan tres definiciones fundamentales de desbalance de voltaje como indicadores y variables para el análisis del problema planteado:

1) Factor de desbalance de voltaje de línea (FDVL), según la definición de la NEMA:

$$FDVL = \frac{\text{máxima magnitud de desviación de voltaje con respecto al voltaje de línea promedio}}{\text{magnitud del voltaje de línea promedio}} \times 100$$

2) Factor desbalance de voltaje de fase (FDVF), según la definición de la IEEE Std. 141:

$$FDVF = \frac{\text{máxima magnitud de desviación de voltaje con respecto al voltaje de fase promedio}}{\text{magnitud del voltaje de fase promedio}} \times 100$$

3) Factor de desbalance de voltaje (FDV) definido como:

$$FDV = \frac{\text{componente de voltaje de secuencia negativa}}{\text{componente de voltaje de secuencia positiva}} \times 100$$

CONSIDERACIONES INICIALES

En un trabajo reciente, Chen-Yin Lee [1] realiza una comparación entre diferentes casos de desbalance de voltaje en términos de las distintas definiciones de desbalance y sus efectos sobre la eficiencia, el incremento de las pérdidas y el factor de potencia, en un motor asincrónico trifásico de 3 hp. En la Tabla 1 se muestran parte de los resultados. Los casos de desbalance están definidos en la primera columna, donde con los símbolos 1f, 2f y 3f se indica en cuántas

fases ocurre la condición anormal; y BV, SB y A, identifican si el problema se trata de bajo voltaje, sobrevoltaje o ángulo, respectivamente. RIP es la razón de incremento de las pérdidas con respecto a la condición balanceada.

Entre otras, Chin-Yin Lee arriba a la conclusión de que tanto la componente de secuencia positiva como la negativa deben ser consideradas a la hora de evaluar los efectos de los desbalances. Analiza cómo a una mayor componente de secuencia positiva (V1) corresponde una mayor eficiencia y un menor factor de potencia (ver Tabla 1); y, de otras partes del trabajo, se evidencia que para V1 constante, un aumento de V2 produce una reducción más marcada de la eficiencia que del factor de potencia (ver Tabla 2).

Sin embargo, el mencionado autor no considera cómo se correlacionan V1 y V2 con la eficiencia y el factor de potencia, es decir, no se puede determinar si hay o no una relación exacta entre esos valores y cuál es. O sea, se pueden predecir las tendencias (esas tendencias son explicables conociendo la teoría de estas máquinas), pero no las magnitudes.

Tabla 1. Comparación entre distintos casos de desbalance de voltaje en términos de distintas definiciones de desbalance y sus efectos sobre la eficiencia y las pérdidas en un motor asincrónico trifásico de 3 hp.

Tipo de desbalance	FDV L	FDV F	FD V	V _a	V _b	V _c	V1	V2	η	RIP	f _p
Balancado	0,00	0,00	0	127,0 ∠0°	127,0 ∠240°	127,0 ∠120°	127,0 0	0,00	83,8 0	1,00	83,1 0
3φ--BV	3,96	7,85	4	110,0 ∠0°	112,7 ∠240°	125,0 ∠120°	115,8 8	4,64	80,5 3	1,26	85,3 0
2φ--BV	3,99	7,90	4	111,8 ∠0°	114,3 ∠240°	127,0 ∠120°	117,7 0	4,71	81,3 8	1,18	84,7 0
1φ--BV	3,94	7,94	4	112,4 ∠0°	127,0 ∠240°	127,0 ∠120°	122,1 2	4,89	81,5 1	1,15	83,8 9
2φ--Λ	3,96	0,00	4	127,0 ∠0°	127,0 ∠231,9°	127,0 ∠116,0°	126,7 9	5,09	82,2 5	1,11	83,0 0
1φ--Λ	3,41	0,00	4	127,0 ∠0°	127,0 ∠240°	127,0 ∠113,1°	126,8 0	5,07	83,0 4	1,06	82,9 0
1φ--SV	4,04	8,01	4	142,9 ∠0°	127,0 ∠240°	127,0 ∠120°	132,2 9	5,29	83,2 3	1,04	81,6 0
2φ--SV	3,64	7,37	4	145,9 ∠0°	138,3 ∠240°	127,0 ∠120°	137,0 6	5,48	83,4 0	1,02	81,2 0
3φ--SV	3,55	7,19	4	148,2 ∠0°	139,7 ∠240°	129,0 ∠120°	138,9 8	5,56	83,5 8	1,02	80,8 0
3φ--BV	6,00	11,8 1	6	103,2 ∠0°	107,2 ∠240°	125,0 ∠120°	111,7 8	6,71	79,6 7	1,33	85,4 0
2φ--BV	6,00	11,8 9	6	105,0 ∠0°	108,6 ∠240°	127,0 ∠120°	113,5 4	6,81	80,2 0	1,28	85,2 0
1φ--BV	5,91	12,0 2	6	105,4 ∠0°	127,0 ∠240°	127,0 ∠120°	119,8 1	7,19	80,8 5	1,22	84,8 0
2φ--Λ	5,91	0,00	6	127,0 ∠0°	127,0 ∠227°	127,0 ∠113,9°	126,5 2	7,59	81,4 8	1,18	83,4 0
1φ--A	5,33	0,00	6	127,0 ∠0°	127,0 ∠240°	127,0 ∠109,7°	126,5 5	7,59	81,8 6	1,15	82,9 0
1φ--SV	6,10	11,9 9	6	151,3 ∠0°	127,0 ∠240°	127,0 ∠120°	135,1 1	8,11	82,1 7	1,12	81,8 0
2φ--SV	5,44	11,0	6	156,0	144,7	127,0	142,7	8,56	82,3	1,11	80,5
3φ--SV	5,35	10,8 5	6	159,0 ∠0°	146,2 ∠240°	129,0 ∠120°	144,7 2	8,68	82,4 9	1,09	79,4 0

Por otra parte, Kersting y Phillips [3] demuestran numéricamente que las pérdidas (y el calentamiento asociado) de los motores dependen no sólo de la magnitud, sino que están notablemente influenciados por el tipo de desbalance, (esto es, que varían según los módulos y ángulos de los voltajes cambien sus valores con respecto a los correspondientes a la condición de ba-

lance [1]) y ponen en evidencia las insuficiencias del factor de reducción de la potencia nominal que la NEMA recomienda, basado únicamente en el FVDL [4].

Tabla 2. Eficiencia y factor de potencia en el motor asincrónico trifásico de 3 hp en condiciones de V1 constante y diferentes valores de V2

FDV	V _a	V _b	V _c	V1	V2	η	fp
0 %	127,0∠0°	127,0∠240°	127,0∠120°	127,0	0,00	83,80	83,10
1 %	122,9∠0°	127,0∠240°	124,8∠120°	127,0	1,27	83,63	83,04
2 %	131,4∠0°	127,0∠240°	122,6∠120°	127,0	2,54	83,55	82,98
3 %	133,6∠0°	127,0∠240°	120,4∠120°	127,0	3,81	83,30	82,95
4 %	135,8∠0°	127,0∠240°	118,2∠120°	127,0	5,08	82,97	82,91
5 %	138,0∠0°	127,0∠240°	116,0∠120°	127,0	6,35	82,72	82,86
6 %	140,2∠0°	127,0∠240°	113,8∠120°	127,0	7,62	82,38	82,74
7 %	142,4∠0°	127,0∠240°	111,6∠120°	127,0	8,90	81,96	82,62

Con ese propósito, calculan que en un motor de 25 hp, 240 V, se produce una diferencia sustancial en el incremento de las pérdidas totales del motor para un FDVL de 5 %, según sea el caso de desbalance. Así, si se mantiene el promedio de las magnitudes del voltaje de línea constante a 240 V, dejando invariable la magnitud de V_{bc} e incrementando la magnitud de V_{ab} en la misma proporción en que se reduce V_{ca}, las pérdidas totales aumentan al 115 %. Por otro lado, con el promedio también constante a 240 V, e incrementando las magnitudes de V_{ab} y V_{ca} mientras que V_{bc} se reduce, las pérdidas sólo aumentan al 105 %. Como puede observarse, hay un 10 % de diferencia con el mismo FDVL, que en este campo es de una gran significación.

En cuanto al factor de reducción de la potencia, demuestran que para el primer caso el valor real sería 0,70, mientras que para el segundo sería 0,77. Esto se compara con el valor que correspondería según la NEMA de 0,75.

Tomando los resultados de [1] como un caso de estudio, los autores del presente trabajo proponen un camino que puede seguirse para encontrar correlaciones, que permitan en un futuro valorar la eficiencia y el factor de potencia de estas máquinas en función de indicadores de la magnitud y tipo de desbalance.

EVALUACIÓN DEL EFECTO SOBRE LA EFICIENCIA

Primeramente, se probó que aunque resulta indiscutible la tendencia al aumento de la eficiencia con V1, no hay muy buena correlación entre esas dos variables. Esto se evidencia en la Figura 1, obtenida a partir de un modelo cuadrático que, desde el punto de vista estadístico, es el que mejor describe el fenómeno (aunque a partir de determinados valores elevados de V1 presenta dificultades). El error estándar de estimación para el modelo mostrado en la Figura 1 es de 0,52, con $R^2 = 0,83$.

Lo anterior pone en evidencia que hay que analizar una combinación de variables que influyen en la eficiencia. Esto se vio muy claro al haber encontrado que sólo existirá una buena correlación entre h y V2, para los valores dados en la Tabla 1, si se considera la relación entre V2 y V1, que viene dada por el valor de FDV. Así, en la Figura 2 se muestra que se obtiene un $R^2 = 0,93$ para FDV = 4 % y un $R^2 = 0,98$ para FDV = 6 %.

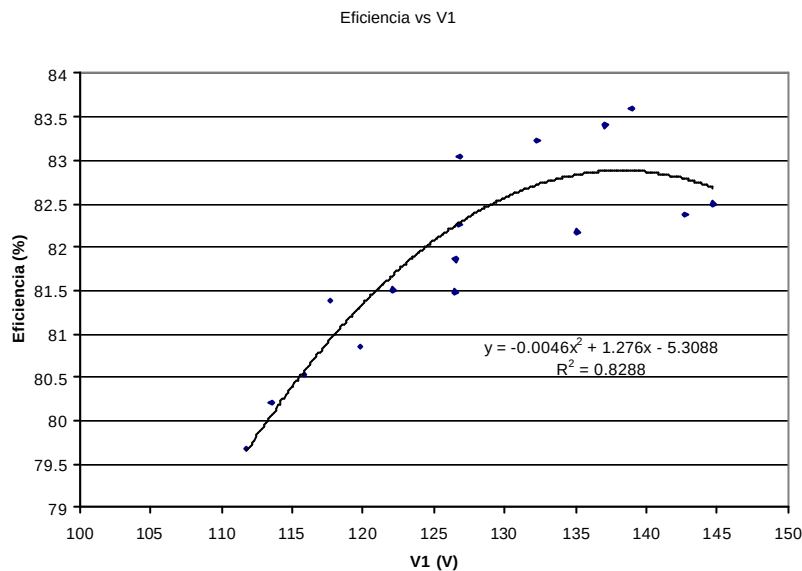


Figura 1. Eficiencia en función de la componente de secuencia positiva

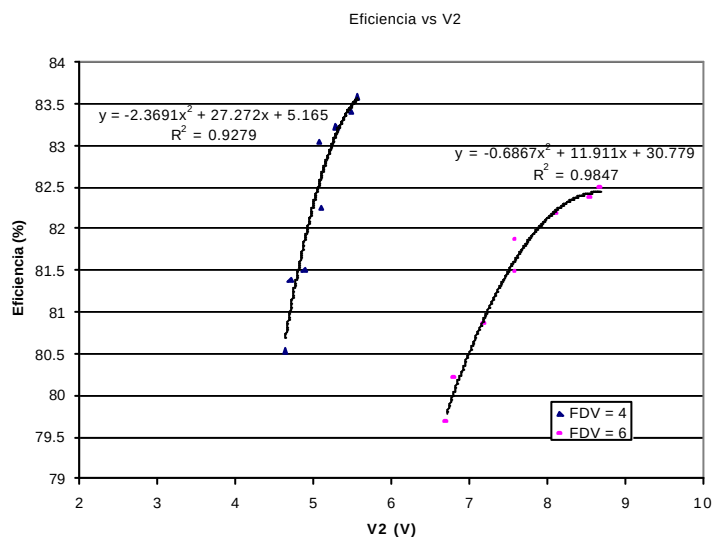


Figura 2. Eficiencia en función de la componente de secuencia negativa

Una mejor correlación podría lograrse con un modelo que incluye las variables V1 y

V2. El modelo en cuestión sería:

$$\eta = 23,94 + 0,81 * V1 - 2,60 * 10^{-3} (V1 * V2) - 2,70 * 10^{-3} * V1^2 \quad (\%)$$

(1)

Con él se obtiene un coeficiente de regresión múltiple de 0,95 y un error estándar de estimación de 0,29.

Se analizó también la influencia que tiene el factor FDVL en la eficiencia por medio del modelo de regresión múltiple:

$$\eta = 70,78 + 0,11 * V1 - 1,04 \times 10^{-2} * (V1 * V2) - 4,03 \times 10^{-3} * (FDVL * V1) \quad (\%)$$

(2)

A través de este modelo, se obtiene un coeficiente de regresión de 0,95 y un error estándar de 0,41.

Con esto se demuestra que para estimar la eficiencia a partir de los datos analizados, es mejor tener en cuenta un modelo multifactorial, que hacer el análisis a partir de un parámetro solamente.

EVALUACIÓN DEL EFECTO SOBRE EL FACTOR DE POTENCIA

Un enfoque análogo se siguió para el análisis del efecto del tipo de desbalance sobre el factor de potencia. En este caso, la tendencia es a una disminución lineal del factor de potencia con V1 (ver Figura 3), con una alta correlación y un error estándar de estimación pequeño. Cuando se realiza el análisis de la relación entre el factor de potencia y V2, se evidencia una clara influencia de FDV. En la Figura 4 se observa este comporta-

miento. También se pone de manifiesto que mientras menor es el valor de FDV, mayor es el gradiente de disminución del factor de potencia con V2.

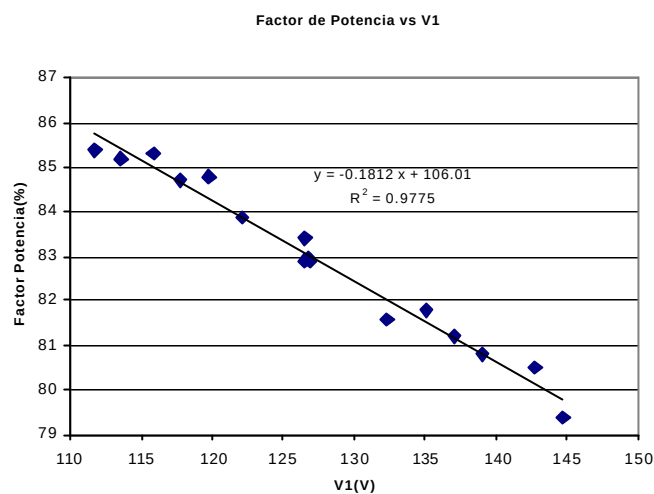


Figura 3. Factor de potencia en función de la componente de secuencia positiva

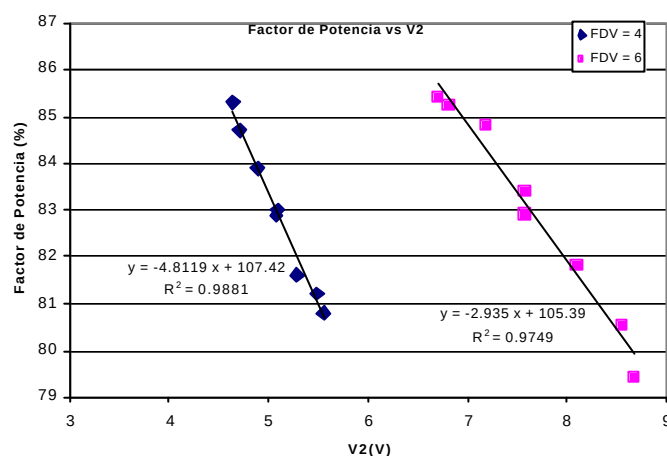


Figura 4. Factor de potencia en función de la componente de secuencia negativa

Tal como en el caso de la eficiencia, una combinación de variables mejora la correlación, aunque levemente. La ecuación que mejor se ajusta a los datos es:

$$fp = 115,892 - 2,0434 * FVDL + 0,1828 * V1 - 1,6685 * V2 - 0,3388 * FVDL * V2$$

(%) (3)

Con ella se obtiene un coeficiente de regresión múltiple de 0,98 y un error estándar de estimación de 0,28.

CONSIDERACIONES FINALES

Evidentemente, los modelos fueron desarrollados para un caso. Resta un complejo trabajo para llegar a resultados que permitan lograr un modelo general, que posibilite en un futuro valorar la eficiencia y el factor de potencia en función de determinadas características y parámetros de estas máquinas (parámetros que sean racionalmente medibles en la industria y por métodos poco invasivos), y de la magnitud y tipo de desbalance.

CONCLUSIONES

1. En el caso de la eficiencia, se demuestra que la correlación con V1 no es muy buena y que para obtener una adecuada correlación entre la eficiencia y V2, hay que tener en cuenta la relación entre V2 y V1, que está dada por FDV.
2. Se establece la conveniencia de realizar la estimación a partir de la combinación de varios de los factores considerados. Para el caso particular analizado, esto está dado por los modelos de las ecuaciones (1) y (2), con lo que se obtiene un error pequeño.
3. En el caso del factor de potencia, la correlación con V1 es alta. Pero también aquí mejora con una combinación de variables.
4. Es necesario continuar profundizando en la búsqueda de un modelo general, teniendo en cuenta el efecto que necesariamente tendrán las características particulares de cada motor.

NOMENCLATURA

fp: factor de potencia

FDV: factor de desbalance de voltaje (%)

FDVF: factor desbalance de voltaje de fase (%)

FDVL: factor de desbalance de voltaje de línea (%)

RIP: razón de incremento de las pérdidas con respecto al caso balanceado

V1: componente de voltaje de secuencia positiva (V)

V2: componente de voltaje de secuencia negativa (V)

V_a, V_b, V_c : voltajes de las fases a, b y c, respectivamente (V)

h: eficiencia (%)

REFERENCIAS

- [1]. Ching-Yin Lee. Effects of Unbalanced Voltage on the Operation Performance of a Three-Phase Induction

Motor. IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 14, No. 2, June 1999, pp. 202-08.

[2]. Andreas, J.C. Energy-Efficient Electric Motors. Selection and Application, 2nd Edition, Marcel Dekker, Inc, New York, 1992, 272 pp.

[3]. Kersting, W.H. y W.H. Phillips. Phase Frame Analysis of the Effects of Voltage Unbalance on Induction Machines. IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 33, No. 2, March/April 1997, pp. 415-20.

[4]. ANSI/NEMA Standards MGI, Part 14, pp. 7, 1987.

DATOS DE LOS AUTORES

Autor principal

Apellidos: Viego Felipe

Nombres: Percy Rafael

Grado Científico: Doctor en Ciencias Técnicas

Categoría Docente: Profesor Titular

Centro de Trabajo:

Centro de Estudio de Energía y Medio Ambiente (CEEMA)

Universidad de Cienfuegos

Dirección: Carr. Camajuaní km. 4, Cuatro Caminos, Cienfuegos, Cuba.

Teléfono: (432) 511963

Fax: (432) 522762

E.mail: pviego@fmec.ucf.edu.cu

Coautor

Apellidos: Cogollos Martínez

Nombres: Juan Bautista

Grado Científico: Doctor en Ciencias Técnicas

Categoría Docente: Profesor Asistente

Centro de Trabajo:

Centro de Estudio de Energía y Medio Ambiente (CEEMA)

Universidad de Cienfuegos

Dirección: Carr. Camajuaní km. 4, Cuatro Caminos, Cienfuegos, Cuba.

Teléfono: (432) 511963

Fax: (432) 522762

E.mail: jcogollo@fmec.ucf.edu.cu