

Incertidumbre en la evaluación del ahorro de energía por sustitución de motores eléctricos

Elías V. De la Rosa Masdueño

Universidad de Camagüey. Cuba

erosa@em.reduc.edu.cu

Percy Viego Felipe

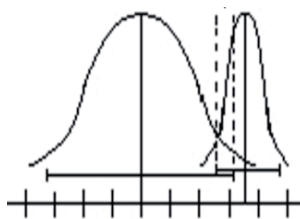
Universidad de Cienfuegos. Cuba

pviego@fmec.icf.edu.cu

Ángel Costa Montiel

Centro de Investigaciones y Pruebas Electro Energéticas. Habana, Cuba

aacm@electrica.cujae.edu.cu



RESUMEN

Se analiza la influencia de la incertidumbre de las mediciones y de la especificación de la eficiencia de un motor en la evaluación del potencial de ahorro de energía por la sustitución de motores eléctricos. Se establece que la simple acción de sustituir un motor de baja eficiencia por uno aparentemente más eficiente no garantiza un ahorro real de energía por lo que debe hacerse un análisis de la probabilidad de la dispersión de la eficiencia para la toma de decisión.

PALABRAS CLAVES

Motor de inducción, eficiencia, incertidumbre, matemática difusa.

ABSTRACT

The influence of the uncertainty in the measurement and specification of motor efficiency for the evaluation of potential energy saving by the substitution of electrical motors is analyzed. It is established that the simple action of substituting a low efficiency motor by an apparently greater efficiency one is not a warranty of real energy saving, hence a probability analysis of the efficiency dispersion must be performed for decision making.

KEYWORDS

Induction motor, efficiency, uncertainty, fuzzy.

INTRODUCCIÓN

Desde la crisis energética de 1972 hasta los últimos acontecimientos que han llevado y mantenido el precio del petróleo por encima de los 50 USD el barril,¹ el tema del ahorro energético se ha convertido en una prioridad en la esfera de los servicios de alta demanda energética como los procesos de fabricación industrial, el turismo y la salud.

Los motores eléctricos y en especial los motores de inducción constituyen los principales consumidores de energía en estos sectores de alta importancia

económica. Por otro lado, si antiguamente el precio inicial del motor era un factor determinante, con la elevación del precio de la electricidad en más de 5 veces, el consumo de energía se convierte en el componente principal del costo, sobrepasando el precio inicial del motor en menos de un año.²

En publicaciones recientes^{3, 4, 5, 6} sobre el tema de sustitución de motores con baja eficiencia o medición de la eficiencia en la industria, existe generalmente un factor que no ha sido tomado en cuenta. Este es que la simple sustitución de un motor cuya eficiencia medida sea inferior que la nominal del posible sustituto, no garantiza el mejoramiento de la eficiencia, ya que existe un rango de valores de eficiencia probable, debido a la incertidumbre en la medición y en la declaración de la eficiencia.

El objetivo de este trabajo es analizar la influencia que puede tener esta incertidumbre en la evaluación del potencial de ahorro de energía al sustituir motores eléctricos por otros más eficientes.

DESARROLLO

Incertidumbre en la declaración de eficiencia

Para comprender el significado de la eficiencia nominal de un motor es necesario conocer como se forma este dato de placa.⁷ El procedimiento puede diferir de un país a otro de acuerdo a su norma nacional, aunque en general los países productores siguen las recomendaciones de la IEC, en específico IEC 60034.⁸ De acuerdo con esta norma, la declaración de eficiencia debe ajustarse a que las pérdidas se conozcan con una incertidumbre de $\pm 15\%$ o mejor para motores de menos de 50Kw y de 10% para motores mayores. Entonces los valores nominales de eficiencia están estandarizados para tener en cuenta esta incertidumbre. La norma NEMA MG1 12-8 establece estos valores de eficiencia en los Estados Unidos fijando el valor mínimo que el fabricante debe garantizar. Como ejemplo la tabla I muestra una selección de estos valores.⁵

Obsérvese que los valores nominales de la eficiencia se separan de tal manera que los mínimos no invadan la siguiente categoría. Para una eficiencia nominal del 93.6% la misma podría estar en los límites de 94.2% a 93.0% si las pérdidas tienen una incertidumbre del 10%. Los llamados valores mínimos, son aquellos

Tabla I. Valores nominales y mínimos de eficiencia para motores eléctricos establecidos por la norma NEMA MG1 12-8.

Nominal	Mínimo	Nominal	Mínimo
95.0	94.1	90.2	88.5
94.5	93.6	89.5	87.5
94.1	93.0	88.5	86.5
93.6	92.4	87.5	85.5
93.0	91.7	86.5	84.0
92.4	91.0	85.5	82.5
91.7	90.2	84.0	81.5
91.0	89.5	82.5	80.0

en los que la incertidumbre está aproximadamente multiplicada por un factor de seguridad de $k=2$, por tanto para este caso sería 92.4%.

Los fabricantes toman una muestra de los motores que fabrican y los someten a ensayos para determinar entre otras características la eficiencia a carga nominal. Si han ensayado diez motores, estos pueden tener valores de eficiencia cuya dispersión debe estar dentro de la incertidumbre establecida en las normas o de lo contrario existen problemas en el proceso de manufactura. El valor promedio de esta eficiencia se compara con la tabla de valores nominales estandarizados y se toma el valor más próximo inferior. O sea si la eficiencia de un grupo de motores tuvo una media de 90.4%, se selecciona 90.2% que es el valor inferior más próximo en la tabla I.

Esta eficiencia a su vez puede ser determinada por distintos métodos o variantes de ellos, por ejemplo el diagrama circular o el del dinamómetro, y a su vez de acuerdo a la norma nacional seguida se tienen consideraciones distintas en el tratamiento de las pérdidas como en el caso de la norma japonesa JEC-37⁹ que desprecia las pérdidas adicionales y la IEEE 112¹⁰ las considera de varias formas dependiendo del método o los datos iniciales. Así la eficiencia determinada por una norma puede ser distinta de la determinada por otra. Esto significa que un mismo motor al que se le aplica la norma norteamericana tiene una eficiencia menor que si se le aplica la norma japonesa, pudiendo alcanzar valores nominales diferentes, como se demuestra en estudios comparativos.¹¹

Así se puede admitir que la eficiencia nominal de un motor está dada por una dispersión de carácter aleatorio de valores que comprenden desde el valor central más o menos una desviación que puede interpretarse como una desviación estándar para los efectos estadísticos. Esta desviación puede ser tomada como la dispersión de eficiencia obtenida por la incertidumbre con que se garantizan las pérdidas. Si en vez de ello se tomaran los valores de eficiencia mínima, se tendría un valor exagerado de esta dispersión. Este valor mínimo no es más que una garantía que ofrece el fabricante.

Incertidumbre en la determinación de la eficiencia en la industria

La incertidumbre en la determinación de la eficiencia en condiciones industriales depende de varios factores como: la precisión de los instrumentos, el método utilizado, y la estabilidad de la carga.

Normalmente esta determinación se realiza siguiendo el método de segregación de pérdidas o una mezcla de métodos con segregación de pérdidas y que con los instrumentos digitales actuales permiten obtener incertidumbres en la medición que están dentro del rango que establece IEC 60034-2.^{8, 11, 12, 13}

Por ejemplo, para un grupo de tres motores cuyos datos aparecen en la tabla II se obtuvieron valores de eficiencia e incertidumbres expandidas que se muestran en la tabla III, con un grado de confianza del 95% ($k=2$).¹²

Motor	Pn (w)	I (a)	V (v)	rpm
1	3000	13	220	1750
2	2050	5,5	220	1750
3	5500	20,1	220	1750

Motor	Eficiencia	Eficiencia min	Eficiencia max
1	$0.757 \pm 2 \times 0.0083$	0.740	0.774
2	$0.772 \pm 2 \times 0.0080$	0.756	0.788
3	$0.860 \pm 2 \times 0.0160$	0.828	0.892

Estos resultados se pueden ver mejor en el gráfico de la figura 1. Pudiera pensarse que el motor número tres cuya eficiencia medida es de 86% puede ser sustituido por otro nuevo cuya eficiencia es 89.5%, pero esta decisión puede ser errónea si no analiza la incertidumbre de ambos valores.

Considerando que la dispersión sigue una distribución normal, entonces se puede analizar en un gráfico donde ambas eficiencias estén representadas con su distribución lo que aproximadamente aparece en la figura 2.

Del gráfico se puede observar como los rangos de eficiencia que para el motor probado van desde 82.8% hasta 89.2% y del motor nuevo que van desde 90.6% hasta 88.5%, se interceptan, pudiendo decirse que en una primera aproximación el motor sustituto no garantiza un ahorro de energía, pero esta intercepción cubre un área que representa una pequeña probabilidad para el motor instalado y menos de la mitad para el motor nuevo, y la probabilidad de que ambos eventos ocurran simultáneamente sería

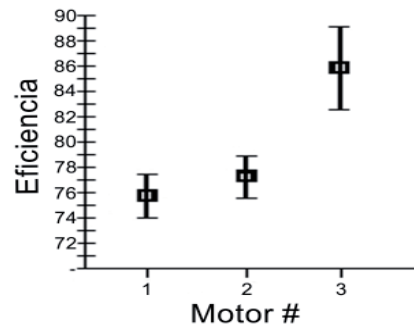


Fig. 1. Dispersión de la eficiencia.

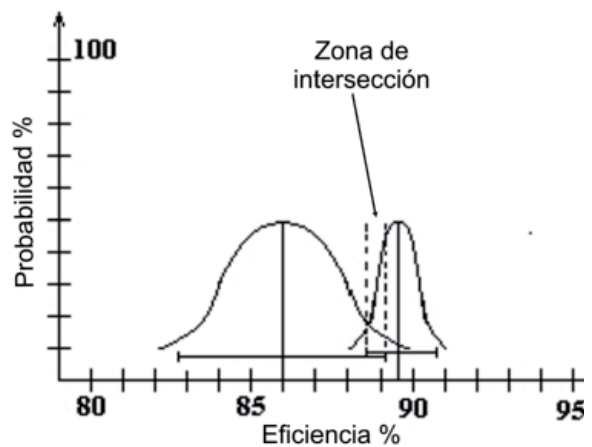


Fig. 2. Intersección entre las probabilidades de los valores de eficiencia.

el producto de ambas probabilidades, por lo que puede apreciarse que todavía este motor sustituto puede mejorar la eficiencia con una probabilidad que supera el 80%.

Un análisis similar se puede realizar cuando se tienen dos motores cuyas eficiencias han sido medidas en planta.

ANÁLISIS CON TÉCNICAS DE NÚMEROS DIFUSOS

Un enfoque atractivo para simplificar el análisis consiste en la “fuzzificación” del problema, lo que es una consecuencia de la naturaleza de la medición en general y de la eficiencia en particular, que no constituye un número definido, sino una dispersión de valores probables con distinta probabilidad.¹⁴ A cada valor de la eficiencia con su dispersión asociada se le trata como un número difuso con una incertidumbre igual a la incertidumbre expandida ya conocida.

$$X = X_i \pm U_i \quad (1)$$

Al número difuso X se le asigna el valor X_i con una incertidumbre U_i . En este caso se tendrán dos números difusos que representan las eficiencias a comparar del motor instalado X_1 y su sustituto X_2 .

Para el análisis con técnicas de números difusos se debe primero realizar un cambio de probabilidad a posibilidad que es el concepto usado en la matemática difusa y asignarle una forma de distribución del peso adecuada. Considerando el carácter gaussiano de la dispersión de valores en la medición, se desprecian distribuciones asimétricas del peso de la posibilidad tales como el trapecio asimétrico o el triángulo asimétrico, tampoco es atractiva una curva de campana que sería reproducir la de probabilidad sin simplificar y una forma rectangular no reproduciría adecuadamente el efecto de distinta posibilidad para valores alejados del centro, por lo que se seleccionó sustituir la curva de probabilidad gaussiana por una curva triangular de posibilidad cuyos valores extremos son de cero posibilidad para una desviación del valor central igual a la incertidumbre expandida^{15,16} U_i . Esto simplifica considerablemente el problema como se aprecia en la figura 3.

La comparación de ambos valores se puede realizar de varias formas, una es determinando si

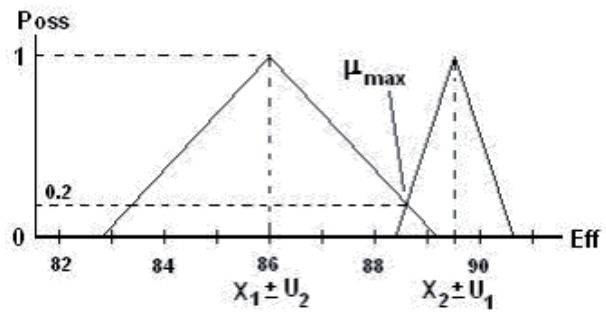


Fig. 3. Representación difusa.

X_2 pertenece a X_1 , y la otra si X_2 no pertenece a X_1 , ambas operaciones difusas son complementarias por lo que se tomará la segunda o sea que los números son diferentes

La no pertenencia de X_2 a X_1 se determina por medio de una regla estricta de comparación a través de la expresión:

$$Poss = 1 - \mu_{\max} \quad (2)$$

O sea que la posibilidad es uno menos el valor máximo de la intersección, para este caso el resultado es 0.8, por lo que se pudiera asegurar que la eficiencia del motor 2 es distinta de la del motor 1 y por tanto su sustitución mejorará la eficiencia.

La operación difusa anterior puede implementarse en las computadoras actuales e incluso pueden realizarse gráficas manuales, lo que facilita la comparación.

El valor admisible de la pertenencia se puede determinar por varias técnicas entre ellas criterios de expertos.

CONCLUSIONES

- Es necesario el análisis de la incertidumbre con que se conocen las eficiencias de los motores eléctricos al tomar la decisión de cambiar un motor por otro de mayor eficiencia nominal o de trabajo. Despreciar el análisis de incertidumbre puede dar lugar a una falsa declaración de mejora de eficiencia.
- No sólo es necesario conocer la dispersión de valores de eficiencia, sino que también es necesario llevar a cabo un análisis de la probabilidad de la dispersión de la eficiencia para la evaluación del potencial de ahorro de energía y la toma de decisión.

REFERENCIAS

1. Unión Cubapetróleo, Grupo de Gestión del Conocimiento. OPEP Regirá Crudo del ALBA. Infomundi. No 11. Semana del 23 al 29 de Enero del 2007. p.6
2. Dale M. Brethauer, Richard L. Doughty and Robert J. Puchett,. The Impact of Efficiency on the Economics of New Motor Purchase, Motor Repair, and Motor Replacement. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.30, No.6, November/December 1994.
3. Costa Ángel, Vilaragut Miriam, Determinación del comportamiento energético del motor de inducción a partir de sus datos de catálogo y la lectura de las corrientes del estator, III Taller Caribeño de Energía y Medio Ambiente, Cienfuegos, Cuba, 2004.
4. García Michel, Viego Percy R. Determinación de los parámetros de un motor asincrónico bajo condiciones de ondas no sinusoidales, III Taller Caribeño de Energía y Medio Ambiente, Cienfuegos, Cuba, 2004.
5. Litman Todd, Efficient Electric Motor Systems Handbook. Pennwell Publishing Company. Tulsa, USA. 1995. 320 pp.
6. Pérez Ignacio, Estimación de parámetros energéticos de motores de inducción en servicio, III Taller Caribeño de Energía y Medio Ambiente, Cienfuegos, Cuba, 2004.
7. Keinz. John. Houlton R. "NEMA nominal Efficiency-What is it and Why" IEEE transactions on Industry Applications. Vol IA-17 No 5, Sep/Oct 1981.
8. International Electrotechnical Commission Standard. IEC 600034-2. 1972.
9. Japan Electrotechnical Commission Standard JEC-37, 1961.
10. IEEE Standard 112, Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators. IEEE, 2004.
11. De la Rosa Elías. "Metodología para la determinación y mejoramiento de la eficiencia de los accionamientos eléctricos en la industria". Tesis de maestría. Universidad de Camagüey 1998.
12. De la Rosa Elías, "Importance of the Uncertainty in the Efficiency Determination of Induction Motors on Industry". Proceedings of the International Conference on Electrical and Computer Engineering ICECE 2003. Bahir Dar University, Ethiopia, 2003.
13. De la Rosa Elías. "Errores en la determinación de la eficiencia de los motores en la industria" Memorias del Congreso Internacional Metrología 96", Habana Cuba 1996.
14. CENAM. Guía BIMP/ISO Para la expresión de la incertidumbre en las mediciones. Centro Nacional de Metrología. México. 1994. 124 pp.
15. Alzate A. Bravo J. Aproximación difusa en funciones reales. Scientia et Technica Año X, No 24, Mayo 2004. pag 265-268
16. Ishibuchi H, Morioka K. Learning By Fuzzified Reasoning. International Journal of Approximated Reasoning, No 13. 1995. pag 327-358.

Ingenierías en línea

<http://ingenierias.uanl.mx>