



ISSN 1988-6047 DEP. LEGAL: GR 2922/2007 N° 25 – ENERO DE 2009

“RENDIMIENTO DE LAS MÁQUINAS ELÉCTRICAS”

AUTORIA ANDRÉS ANTONIO GIL MARTÍN
TEMÁTICA TECNOLOGÍA
ETAPA BACHILLERATO

Resumen

En este artículo se explican y desarrollan conceptos tales como potencia y rendimiento de las máquinas eléctricas en general y concretamente de c.a, Que aunque ya conocidos por el alumnado no dejan de ser a nivel básico por la complejidad de algunos de los factores que intervienen y la cantidad de objetivos que se deben impartir durante el curso, por lo que se pretende ampliar los conocimientos básicos del alumnado más allá de los que se imparten en la asignatura de tecnología, los cuales deben de ser, o deberían de ser conocidos por el cuerpo docente de la asignatura.

Palabras clave

Máquina eléctrica, pérdida, potencia, rendimiento...

1. PÉRDIDAS Y CALENTAMIENTOS

En el proceso de transformación electromecánica que se lleva a cabo dentro de toda máquina eléctrica, una parte de la potencia que se ha transformado, se convierte en calor constituyendo lo que se conoce como pérdidas de la máquina.

Recordemos antes de todo que la máquina eléctrica está constituida por un circuito eléctrico, del que forman parte el inductor y el inducido.

Dentro de las pérdidas que se producen en este tipo de máquinas, podemos distinguir:

- Pérdidas en el cobre.- son las pérdidas producidas por el efecto Joule, esto es, que en cualquier conductor por el que circula una corriente eléctrica se produce una transformación de la energía eléctrica en energía calorífica, a consecuencia de tener que vencer la resistencia del conductor. Esta definición responde a la siguiente ecuación:

$$P_{cu} = \sum R_j I_j^2$$

Donde:

R_j es la resistencia del devanado. La resistencia se puede definir a través de su unidad que es el Ω (ohmio), que es : "es la resistencia de un conductor que teniendo aplicada entre sus extremos una d.d.p. de un voltio está recorrido por una corriente de una amperio".

$R = l/\sigma S$ donde σ es la conductividad y S es la sección del conductor.



ISSN 1988-6047 DEP. LEGAL: GR 2922/2007 N° 25 – ENERO DE 2009

I_j es la corriente (intensidad) que recorre el devanado.

Cuando nos referimos al devanado, este puede ser el del inductor o del inducido.

Como sabemos que la resistividad (ρ) es la inversa de la conductividad del conductor ($\rho = 1/\sigma$), y se puede definir como la resistencia que ofrece una barra de la sustancia en cuestión (material del conductor) de un m^2 de sección y un m de longitud; sus unidades son Ωm . Podemos entonces poner la anterior expresión de la forma:

$$P_{cu} = \sum \rho_j (I_j / S_j) I_j^2$$

Si multiplicamos y dividimos la formula anterior por S_j .

$$P_{cu} = \sum \rho_j (I_j / S_j)^2 S_j$$

Si ahora consideramos que la densidad de corriente (J) es $J = I/S$ y el volumen es $S \cdot l$, entonces.

$$P_{cu} = \sum \rho_j J_j^2 \cdot \text{volumen}$$

Donde se expresan las pérdidas en el cobre en función de la resistividad, densidad de corriente y volumen del bobinado empleado. Como se puede apreciar las pérdidas son proporcionales al volumen del material y a la densidad de corriente que circula por los conductores, esta densidad suele tomar unos valores que oscilan entre los 5 A/mm² de las máquinas más pequeñas hasta los 3 A/mm² las más grandes.

- Pérdidas en el hierro.- son aquellas que se producen en los órganos de la máquina que son recorridos por flujos variables. Estas pérdidas a su vez se pueden dividir:
 - Pérdidas por histéresis.

$$P_H = V K_H f B_m^\alpha$$

- Pérdidas por las corrientes parásitas de Foucault.- recordemos que siempre que se produce un cambio de flujo magnético aparecen corrientes inducidas, como el conductor es metálico, cuando este está inmerso en un campo magnético variable o bien se mueve dentro de un campo magnético, aparecen en su interior corrientes cerradas inducidas, en torbellino (los electrones libres del metal se ponen en movimiento), que se conocemos como corrientes de Foucault, que se oponen a la variación del flujo dentro del metal. A consecuencia de estas corrientes se produce un calentamiento en el metal debido al efecto Joule.

$$P_F = V K_F f^2 B_m^2 a^2/\sigma$$

Las perdidas en el hierro se pueden obtener como la suma de ambas pérdidas, esto es:



ISSN 1988-6047 DEP. LEGAL: GR 2922/2007 N° 25 – ENERO DE 2009

$$P_{Fe} = P_H + P_F = V (K_H f B_m^\alpha + K_F f^2 B_m^2 a^2 / \sigma)$$

Donde:

K_H y K_F son constantes.

B_m es la inducción máxima.

a es el espesor de las chapas magnéticas.

σ es la conductividad del material de las chapas.

α es un parámetro.

V es el volumen de hierro.

La forma de paliar en lo posible estas pérdidas es mediante el empleo de núcleos magnéticos de acero al silicio en forma de chapas aisladas entre sí. Con la adición de silicio se reducen las pérdidas por histéresis y también empleando aislamiento entre las chapas se consigue disminuir las pérdidas debidas a las corrientes de Foucault. Estas chapas es aconsejable laminarlas en frío (granos orientados) en lugar de hacerlo en caliente, ya que con el primer método reduciremos las pérdidas a valores comprendidos entre 0,4 y 0,5 Wb/Kg a 1 Tesla, mientras que con el segundo (laminación en caliente) las variaciones en las pérdidas serán de 0,8 a 1,3 Wb/Kg también a 1 Tesla. El Tesla es la unidad de inducción magnética y se puede definir como el campo magnético B (recordemos que es un vector) que produce una fuerza de un newton sobre una carga de un culombio que se mueve normalmente al campo con una velocidad de un metro por segundo.

$$1T = 1 \text{ Ns/Cm} = 1 \text{ Nsm/Cm}^2 = 1 \text{ Js/Cm}^2 = 1 \text{ Vs/ m}^2 = 1 \text{ Wb/ m}^2$$

- Pérdidas mecánicas.- se producen lógicamente en aquellas máquinas con órganos móviles, como es el caso de los motores y los generadores, y más concretamente son consecuencia directa del movimiento giratorio del rotor. Las pérdidas mecánicas se pueden clasificar en función del lugar donde se producen las pérdidas:

- Pérdidas mecánicas por rozamiento y fricción.
- Pérdidas mecánicas por ventilación.

Las pérdidas mecánicas se pueden evaluar mediante la siguiente expresión:

$$P_m = A n + B n^3$$

Donde: A son las pérdidas por rozamiento y fricción.

B son las pérdidas por ventilación.

n es la velocidad de órgano giratorio de la máquina (rev/min).

Las pérdidas sean del tipo que sean (P_{cu} , P_{Fe} ó bien P_m) se pueden agrupar en función de la forma en que varían dichas pérdidas. Así tenemos:

- Pérdidas fijas.- son aquellas que no varían aunque cambie la potencia absorbida o cedida por la máquina.
- Pérdidas variables.- son aquellas que varían según la potencia que absorbe o cede la máquina.



ISSN 1988-6047 DEP. LEGAL: GR 2922/2007 N° 25 – ENERO DE 2009

Como se puede deducir de la fórmula de las pérdidas mecánicas, estas dependen directamente de la velocidad, y como la mayoría de las máquinas trabajan con velocidades constantes o sino casi, entonces podemos considerar estas pérdidas como tales, es decir, las pérdidas mecánicas de la máquinas son constantes. Las pérdidas en el hierro también se pueden considerar constantes, ya que las máquinas suelen trabajar con unos valores de B y f constantes y como se vio anteriormente el valor de P_{Fe} solo dependía de estas dos variables. Las únicas pérdidas variables son las del efecto Joule que se producen en los devanados, como consecuencia de una variación de potencia en la máquina; esto conlleva un cambio de la corriente en dichos devanados.

En consecuencia de lo anteriormente dicho, podemos sacar en claro, que las pérdidas fijas están constituidas por las pérdidas en el hierro y las mecánicas, esto es, $P_{Fijas} = P_{Fe} + P_m$. Mientras que las pérdidas variables son debidas como se ha dicho a las pérdidas debidas al efecto Joule en el cobre del devanado $P_{variables} = P_{cu}$.

Todas las pérdidas se transforman en energía calorífica. Este calor, se transmite en parte al medio ambiente, por radiación y/o convección siendo absorbido en parte por la estructura de la máquina, elevando la temperatura de la misma, elevación que está en relación con su calor específico. La temperatura de la máquina será constante cuando la cantidad de calor a consecuencia de las pérdidas se iguale a la cantidad de calor cedida al ambiente. Cuando sucede esto, se dice que la máquina ha alcanzado la temperatura de régimen.

La temperatura de régimen, es una magnitud de gran importancia, ya que a partir de ella se puede determinar, por ejemplo si los materiales aislantes de la máquina van a trabajar correctamente. Esto es así, ya que por todos es conocido que la temperatura varia considerablemente las propiedades de los mismos y en especial la de los materiales orgánicos, que a grandes temperaturas se carbonizan, perdiendo sus cualidades. Para podernos hacer una idea basta con decir que según la regla de Montsinger, la vida de un aislante se llega a reducir a la mitad por cada $8^{\circ}C$ de incremento de la temperatura de funcionamiento, sobre el valor máximo recomendado. A tal efecto y para evitar que no se sobrepasen las temperaturas máximas aconsejables en los devanados y en las diferentes partes de una máquina, lo que podría constituir el colapso de la misma, surge la norma UNE 20-113-73, que fija una temperatura ambiente convencional y determina a partir de ella la temperatura máxima que puede soportar los distintos aislantes. Esta temperatura ambiente convencional fijada para el cálculo de la temperatura máxima es de $40^{\circ}C$ para una altitud menor de 1000m y para alturas superiores a esta, la norma establece unas reducciones en el calentamiento de la máquina (aislamientos), que oscilarán entre un 2 y un 5% por cada 500m que se superen de los 1000m iniciales.

Así tenemos:

1. *Aislamiento clase A:*

Son los aislamientos a base de algodón, seda, papel y materiales orgánicos análogos, impregnados o sumergidos en aceite; la temperatura máxima que no debe sobrepasarse en ningún caso en este tipo de aislantes es de $105^{\circ}C$.

2. *Aislamiento clase E:*

Son los aislamientos a base de esmalte (hilo esmaltado), de tipo sintético (de acetato de vidrio o con propiedades análogas), no sumergido en aceite; la temperatura máxima que no debe sobrepasarse en ningún caso en este tipo de aislantes es de $120^{\circ}C$.



ISSN 1988-6047 DEP. LEGAL: GR 2922/2007 N° 25 – ENERO DE 2009

3. *Aislamiento clase B:*

Son aislamientos de mica, vidrio y otras sustancias inorgánicas similares, combinadas con material aglutinante orgánico; la temperatura máxima que no debe sobrepasarse en ningún caso en este tipo de aislantes es de 130° C.

4. *Aislamiento clase F:*

Son aislamientos de fibra de vidrio, amianto ,tejido de vidrio, aglomerados de mica, etc.. que estén impregnados con resina de elevada estabilidad; la temperatura máxima que no debe sobrepasarse en ningún caso en este tipo de aislantes es de 150° C.

5. *Aislamiento clase H:*

Son aislamientos de fibra de vidrio, amianto, tejidos de vidrio, aglomerados de mica, etc.. que estén impregnados con resinas de siliconas; la temperatura máxima que no debe sobrepasarse en ningún caso en este tipo de aislantes es de 175° C.

6. *Aislamiento clase C:*

En este caso de aislantes no existe ninguna temperatura máxima establecida, pero esta establece la norma que deberá realizarse mediante ensayos.

2º) POTENCIA NOMINAL.

La potencia nominal de cualquier máquina eléctrica, se define como la potencia que es capaz de desarrollar esta, siempre que no se lleguen a calentamientos en los órganos de la misma que alcancen o sobrepasen las correspondientes temperaturas límites, que como antes se ha visto dependía de los materiales (aislantes) de los que estaba construida. La potencia nominal para los diferentes tipos de máquinas de c.a. se puede definir como:

- En generadores.- la potencia capaz de entregar a la carga, se mide en KVA.
- En motores.- la potencia mecánica capaz de desarrollar el motor en el eje, medida en CV.
- En transformadores.- la potencia capaz de entregar a la carga, medida en los bornes del secundario, en KVA.

Todas las máquinas deben ó deberían de tener en un lugar muy visible, lo que se conoce como placa característica. En esta placa distintiva de la máquina tiene que aparecer su potencia nominal, además de otros valores característicos de la misma, como son: la tensión, la corriente, las r.p.m., el nombre o la marca del distribuidor, su nº de fabricación, etc... En esta placa (en la casilla correspondiente) deberá aparecer el tipo de protección contra objetos sólidos y contra el agua, de que la máquina dispone (estas medidas protectores dependerán de las condiciones de trabajo de la máquina). Para ello se utilizan las siglas I (protección contra objetos) y P (protección contra el agua) seguidas de un número para identificarlas, de acuerdo con la tabla siguiente:



ISSN 1988-6047 DEP. LEGAL: GR 2922/2007 N° 25 – ENERO DE 2009

CIFRA	SIGNIFICADO	
	PRIMERA CIFRA SIGNIFICATIVA. Protección contra contactos directos y Cuerpos extraños.	SEGUNDA CIFRA SIGNIFICAT. Protección contra la penetración de líquidos.
0	Ninguna protección específica contra contactos. Ninguna protección contra la penetración de cuerpos sólidos extraños.	Ninguna protección específica contra el agua.
1	Protección contra contactos directos casuales de grandes superficies, por ejemplo con la mano. Protección contra la penetración de cuerpos sólidos extraños de diámetro superior a 50 mm.	Protección contra la caída vertical de gotas de agua.
2	Protección contra contactos directos con los dedos. Protección contra la penetración de cuerpos sólidos extraños de diámetro superior a 12 mm.	Protección contra caída de gotas de agua inclinadas en cualquier ángulo hasta 15° respecto la vertical.
3	Protección contra contactos directos de herramientas, hilos, etc.. mayores de 2,5 mm de diámetro. Protección contra la penetración de cuerpos sólidos extraños de diámetro superior a 2,5 mm	Protección contra el rociado de agua en un ángulo hasta 60° respecto la vertical.
4	Protección contra contactos directos con herramientas, hilos, etc.. mayores de 1 mm de diámetro. Protección contra la penetración de cuerpos sólidos extraños de diámetro superior a 1 mm.	Protección contra la proyección de agua en todas las direcciones.
5	Protección total contra contactos directos. Protección contra depósitos de polvo perjudiciales.	Protección contra chorros de agua en todas las direcciones.
6	Protección total contra contactos directos. Protección total contra la penetración de polvo.	Protección contra inundaciones pasajeras (por ejemplo, por mar gruesa (“golpe de mar”).
7		Protección contra los efectos de inmersión. (prueba: 30 minutos bajo 1m de agua).
8		Protección contra inmersión prolongada. (prueba según acuerdo entre fabricante y usuario).



ISSN 1988-6047 DEP. LEGAL: GR 2922/2007 N° 25 – ENERO DE 2009

Las máquinas de c.a. como todas las máquinas eléctricas deben de tener un diseño constructivo para evitar:

- Que las personas que estén a su alrededor sufran algún tipo de accidente por contacto directo con las partes móviles o partes bajo tensión de la misma.
- Que cuerpos sólidos y líquidos del exterior se introduzcan dentro de la máquina para que la máquina no sufra daños.

3º) RENDIMIENTO.

El rendimiento para las máquinas eléctricas de c.a es como en todos los tipos de máquina el cociente entre la potencia útil y la potencia absorbida o total, es decir:

$$\eta = \text{Potencia útil } (P_u) / \text{Potencia total } (P_T)$$

Si denominamos a la diferencia entre la P_u y la P_T potencia pérdida (P_p), entonces tenemos:

$$P_T = P_u + P_p$$

Con lo que tenemos que:

$$\eta = P_u / (P_u + P_p)$$

las pérdidas de potencia son debidas como antes se vio a:

$$P_p = P_{Fe} + P_m + P_{cu}$$

Como sabemos que

$$P_p = P_{fijas} + P_{variables}$$

Las pérdidas variables como se vio antes dependían de la intensidad de corriente (I), puesto que, corresponden a pérdidas por efecto Joule en los conductores de cobre que forman el devanado. Como también es conocido por todos que la potencia aparente es $S = VI$, por lo que:

$$P_v = b S^2$$

Y además como la potencia util (P_u) es $= VI \cos \varphi = S \cos \varphi$, entonces la expresión del rendimiento la podemos expresar de la forma siguiente

$$\eta = S \cos \varphi / (\cos \varphi + P_f + b S^2)$$

o expresado de otra forma



ISSN 1988-6047 DEP. LEGAL: GR 2922/2007 N° 25 – ENERO DE 2009

$$\eta = S / S + ((P_f + b S^2) / \cos\varphi)$$

Como la f.d.p es Cte. entonces podemos decir que $a = \cos \varphi$, con lo que la expresión anterior se puede poner de la forma

$$\eta = a S / (a S + P_f + b S^2)$$

Esta ecuación representa una curva de la que podemos sacar su máximo ($d\eta / dS$) que resulta ser $P_f = b S^2$, con lo que la conclusión que sacamos es que el rendimiento es máximo para una potencia aparente S tal, que coincidan las pérdidas fijas con las pérdidas variables.

Conceptos interesantes:

1. **Índice de carga o factor de utilización (C)**. es el cociente entre la potencia aparente útil (S) y la nominal.
2. **Índice de carga óptimo (C_{opt})**. es cuando la potencia útil proporciona al máximo rendimiento, y responde a esta expresión

$$C_{opt} = (P_f / (b S_{nominal}^2))^{1/2}$$

Como conclusión podemos decir, que para obtener un mejor rendimiento de la máquina:

- Se deberá evitar el funcionamiento de esta con pequeñas cargas.
- Se deberá procurar que esta funcione con un índice de carga lo más próximo posible al óptimo.
- Se deberá rechazar las máquinas cuya potencia nominal sea muy elevada con respecto a la que va a dar puesta en funcionamiento.

Bibliografía:

- Fraile Mora, J. (2008) *Máquinas eléctricas*. Madrid: Mcgraw-Hill/ interamericana de España S.A
- Martínez Domínguez, F.(1996) *Tecnología eléctrica*. Madrid: Thomson Paraninfo, S.A.
- Alcalde San Miguel, P (2002) *Electrotecnia*. Madrid: Thomson Paraninfo, S.A.
- Augé, R. (1999) *Curso de electricidad general: tomo I y II*. Madrid: Thomson Paraninfo, S.A.
- Chapman, S. (1993) *Máquinas eléctricas*. Madrid: Mcgraw-Hill
- Wikipedia.

Autoría

-
- Andrés Antonio Gil Martín
 - Granada
 - aagm72@gmail.com