

Guías de Aplicación: Información Técnica de Cummins Generator Technologies

## AGN 182 – Eficiencia Operativa de un alternador

### **CUMPLIMIENTO DEL ALTERNADOR CON CÓDIGOS, ESTÁNDARES Y DIRECTIVAS**

Los alternadores están diseñados para cumplir con los diversos estándares de ingeniería nacionales e internacionales asociados con las máquinas eléctricas rotativas. El desempeño de los alternadores AvK y STAMFORD cumple con la 60034-1. En cuanto al origen y uso de esta Norma, existe una trazabilidad desde IEC, pasando por EN hasta BS, de la siguiente manera:

- IEC 60034-1 es el Estándar que se maneja a nivel mundial
- EN 60034-1 es la versión de la norma IEC adoptada por la Unión Europea
- BS EN 60034-1 es la versión de la norma adoptada por el Reino Unido

Esta norma internacional de ingeniería para máquinas eléctricas rotativas detalla aspectos de las expectativas operativas y se titula "Clasificación y Desempeño". Es este estándar de ingeniería el que define toda la orientación necesaria con respecto a la eficiencia operativa de un generador de CA (alternador).

Este enfoque de la IEC 60034 introduce el concepto de eficiencia "típica" que, cuando se establece y respalda como un valor medido que se mantiene dentro de los parámetros establecidos dentro de una biblioteca de datos de prueba que se actualiza continuamente como fabricante de ese producto, realiza pruebas periódicas de muestreo de calidad como parte de su plan de calidad ISO 9001.

Cuando se especifica un alternador con el requisito de un valor de eficiencia "garantizado", inicialmente se considerará la eficiencia probable de ese alternador individual, en función de la información de la biblioteca de datos de prueba correlacionada con el muestreo de calidad y la

tendencia de rendimiento conocida del material activo que se utiliza actualmente para la fabricación del producto. Esto permite identificar un mejor valor, el cual será debidamente ajustado para asegurar que se satisfaga un valor garantizado. En la mayoría de los casos, ese alternador será seleccionado para pruebas de verificación y validación antes del envío.

## **EFICIENCIA OPERATIVA DE LOS ALTERNADORES**

El estándar 60034-1 describe un método de prueba para establecer la eficiencia del alternador, junto con la introducción de realismo con respecto a las variaciones de rendimiento que inevitablemente estarán presentes como resultado del ancho de banda de tolerancia de especificación de material inevitable asociado con los materiales activos incorporados dentro de las máquinas eléctricas rotativas fabricadas en volumen. El estándar 60034-1 introduce asignaciones para el ancho de banda resultante de los valores de eficiencia medidos para alternadores fabricados en volumen mediante la introducción de una variación permitida en el valor de las pérdidas establecidas. Estos se establecen indirectamente en la Hoja de datos técnicos publicada del alternador, pero se identifican fácilmente como la diferencia entre el 100 % menos el porcentaje de eficiencia declarado del alternador.

- Para alternadores con salida nominal  $\leq 150$  kVA, la tolerancia permitida para la eficiencia es -15%.
- Para alternadores con salida nominal  $> 150$  kVA, la tolerancia permitida para la eficiencia es -10%.

La sección 12 del estándar 60034-1 contiene una tabla que identifica la tolerancia en valores y cantidades.

Item	Quantity	Tolerance
1	Efficiency $\eta$ – machines up to and including 150 kW (or kVA) – machines above 150 kW (or kVA)	-15 % of $(1 - \eta)$ -10 % of $(1 - \eta)$
2	Total losses (applicable to machines with ratings $> 150$ kW or kVA)	+10 % of the total losses

### **Explicación**

Para explicar más; debe aceptarse que, para un alternador determinado, los materiales, la construcción y las condiciones operativas estarán sujetos a tolerancias y variaciones, que en conjunto se combinan para influir en la eficiencia operativa real de un alternador específico que alimenta la carga de una aplicación específica.

Aquellos fabricantes de alternadores que afirmen cumplir con el estándar IEC 60034 habrán realizado el trabajo de prueba de ingeniería necesario para verificar y validar el rendimiento de cada producto para el entorno operativo propuesto. Con respecto a los niveles de eficiencia, se habrán probado varias muestras para establecer un nivel de eficiencia operativa típico, que luego se incluye en la Hoja de datos técnicos publicada del alternador. El muestreo

de calidad garantiza el cumplimiento continuo del estándar y los datos publicados. Este nivel de eficiencia típico es de asesoramiento.

### Ejemplo

Considere el valor de eficiencia publicado para un alternador de más de 150 kVA. La tolerancia advierte que las pérdidas pueden aumentar un 10%. Si se recomienda que la eficiencia típica sea del 92 %, aplicando la consideración del -10 % sugiere:

- Las pérdidas totales podrían ser =  $1,1 (1 - 0,92) = 0,088\text{pu}$ .
- Por lo tanto la eficiencia operativa podría ser =  $1 - 0,088 = 91.2\%$
- Con el alternador aún cumpliendo con IEC 60034-1.

### Pérdidas del alternador

Como se describió anteriormente en este AGN, los alternadores están diseñados para cumplir con el estándar IEC 60034 y los datos técnicos publicados recomiendan valores de eficiencia "típicos". Las pérdidas totales asociadas con la eficiencia operativa de un alternador se pueden dividir en seis áreas distintas. A continuación se identifica cada área e incluye una breve explicación.

#### Pérdidas por fricción y viento

- **Tipicamente representan un 10% de las pérdidas totales del alternador.**
- Estas pérdidas están asociadas con el giro del conjunto del rotor no excitado a la velocidad nominal. La potencia necesaria para accionar el ventilador y así mover el aire de refrigeración requerido a través de las diversas rutas de flujo de aire, representará la mayor parte de estas pérdidas, aunque la construcción irregular del conjunto del rotor de polo saliente y el diodo giratorio se suma a las pérdidas por efecto del viento.
- Las pérdidas por fricción asociadas con los rodamientos de soporte del eje son muy bajas y, por esta razón, no se diferencia la eficiencia de los alternadores de uno o dos cojinetes.
- El rendimiento del ventilador en términos de volumen y velocidad del flujo de aire, y las características de transferencia de calor térmico resultantes a través de las rutas de flujo de aire diseñadas sobre el hierro trasero, a través y alrededor de los salientes y a través del orificio del estator, se han desarrollado para cada tamaño de estructura del alternador. para el sistema de enfriamiento indirecto IC01, para asegurar un buen balance térmico entre el rotor y el estator bajo el rating de salida continuo prescrito. Tales consideraciones toman en cuenta los cambios en la resistencia del circuito de aire con la variacion de la longitud del núcleo y tamaño del alternador.

#### Pérdidas de hierro

- **Tipicamente representan un 12% de las pérdidas totales del alternador.**
- Las pérdidas asociadas con el conjunto de acero laminado del paquete del núcleo del estator están vinculadas con la elección del acero eléctrico, la forma especificada de aislamiento entre laminados, el espesor del acero, combinado con la forma de ranura diseñada y las trayectorias y niveles de flujo magnético operativo resultantes. Sumados, estos factores se combinan para introducir consideraciones complejas que afectan el comportamiento del circuito magnético con pérdidas definidas.
- Los niveles de flujo deben establecerse para permitir que el alternador tenga estabilidad de voltaje de salida en condiciones de carga nominal de 0<100 %, además de una capacidad aceptable en condiciones de sobrecarga transitorias, momentáneas y de corto plazo, como ocurre con la eliminación de fallas, cambios de escalón de carga y condiciones de excitación forzada cuando se arrancan motores, etc.
- Tales consideraciones operativas pueden llevarse al extremo cuando, por ejemplo, soporta una carga no lineal (NLL) o el alternador está "integrado" con una red con un amplio rango de voltaje operativo.
- Un cambio a aceros eléctricos de menor pérdida introduce un proceso de diseño complejo, aceptando que se reducirán las pérdidas en el núcleo del estator, pero a expensas de requerir un mayor esfuerzo de magnetización, lo que aumenta la corriente del rotor y, por lo tanto, aumenta las pérdidas del rotor.

### Pérdidas de cobre en el devanado del estator **Stator Winding Copper Losses**

- **Tipicamente representan un 45% de las pérdidas totales del alternador.**
- La pérdida asociada con el devanado del estator se basa en  $I^2R$ . Donde: 'I' se considera los 'amperios' que se entregan a la carga conectada y, por lo tanto, 'fluyen' a través del devanado del estator. Siendo 'R' la resistencia del devanado del estator, que debe tener en cuenta que el valor óhmico de los devanados aumentará en proporción con la temperatura del devanado, que a su vez tiene una relación directa con el nivel de corriente de carga que se entrega.
- Los ingenieros reconocen que las pérdidas de cobre del devanado del estator representan la mayor parte de la ineficiencia del alternador. Por lo tanto; operar el alternador bajo un nivel de carga donde la corriente de salida 'I' está cómodamente dentro de los límites térmicos del alternador mantendrá 'R' lo más bajo posible y, por lo tanto, ayudará a la unidad a operar con la máxima eficiencia.
- Para la mayoría de los alternadores industriales, operar dentro de la región entre la clasificación de incremento de temperatura Clase B (aumento de 80 °C/ambiente de 40 °C) y la clasificación de incremento de temperatura Clase F (aumento de 105 °C/ambiente de 40 °C) será recompensado al operar en el área de máxima eficiencia operativa.

## Pérdidas extraviadas

- **Tipicamente representan un 12% de las pérdidas totales del alternador.**
- Esta categoría cubre una combinación compleja de pérdidas que los ingenieros de diseño electromagnético asignan como "extraviadas"; siendo un lugar conveniente para atribuir incógnitas complicadas.
- Lo que se acepta es que la mayoría de las pérdidas por dispersión ocurren en y alrededor de la región de los devanados del estator que sobresalen en cada extremo de los paquetes del núcleo de laminación del estator y del rotor. Aquí abundan los circuitos electromagnéticos complejos, asociados por la corriente de carga que fluye en los devanados del estator y los campos magnéticos perdidos del sistema de excitación. Es beneficioso controlar las dimensiones de los devanados que sobresalen y una gestión cuidadosa de su forma y proximidad, pero como las pérdidas parásitas son proporcionales a las pérdidas de cobre del devanado del estator, el beneficio real proviene de operar el alternador a un rating conservador.

## Pérdidas de cobre del rotor

- **Tipicamente representan un 18% de las pérdidas totales del alternador.**
- Las pérdidas asociadas con el devanado del rotor se basan en  $I^2R$ . Donde: 'I' es la corriente del devanado del rotor requerida para lograr los amperios-vueltas del circuito del rotor necesarios para producir el campo electromagnético para excitar el estator. 'R' es la resistencia del devanado del rotor. El nivel de corriente del devanado del rotor se establece por la necesidad de proporcionar un flujo de entrehierro, que mantiene la tensión nominal de salida en las condiciones de funcionamiento establecidas por las características de consumo de corriente de la carga eléctrica conectada. Los niveles de corriente del rotor aumentan generalmente en proporción con la salida nominal y aumentan nuevamente si esa carga tiene un factor de potencia (pf) que no está en la unidad pf.
- Si el alternador se ve obligado a operar fuera del rango de voltaje ideal para el diseño del devanado del estator de ese alternador, o si la carga tiene un factor de potencia retrasado bajo o un contenido alto de armónicos, entonces se encontrarán niveles de saturación magnética, que en conjunto resultan en niveles aún más altos de la corriente del rotor que se demanda. Tales situaciones dan como resultado un aumento de la temperatura del rotor que inevitablemente irradia y aumenta la temperatura del estator y, por lo tanto, el devanado "R" del estator.
- Una vez más, hacer funcionar el alternador dentro de la región entre el valor nominal de incremento de temperatura Clase B (aumento de 80 °C/ambiente de 40 °C) y el valor nominal de incremento de temperatura Clase F (aumento de 105 °C/ambiente de 40 °C), con un factor de potencia lo más cercano a la unidad (1,0) posible, mejora la eficiencia del alternador.

## Pérdidas del excitador

**Tipicamente representan un 3% de las pérdidas totales del alternador.**

En un alternador sin escobillas, el "excitador" incorporado proporciona la amplificación necesaria entre los niveles de potencia bajos del AVR y los niveles de potencia altos requeridos por los devanados del rotor principal. La potencia requerida para esta etapa de amplificación, rotativa, es proporcionada directamente por el motor primario del Grupo Generador.

Las pérdidas del excitador incluyen un producto de pérdidas de cobre y pérdidas de hierro, pero los excitadores deben diseñarse para funcionar en condiciones de cambios de escalón de carga del alternador, condiciones de sobrecarga momentánea y condiciones de sobrecarga de estado estable sin encontrar saturación magnética. Esto requiere que el diseño del excitador se diseñe generosamente con respecto al contenido de hierro y cobre y, por lo tanto, tenga pérdidas  $I^2R$  bajas inherentes.

## Conclusión

El impulso para crear un diseño de alternador rentable; donde se minimiza el uso económico de materiales activos (cobre y acero laminado) para lograr la salida de **kVA más alta posible por kg de material activo**, no dará como resultado un alternador con alta eficiencia operativa en su rating continua de incremento de temperatura Clase H publicado. Esta situación se puede corregir con la debida referencia a las curvas de eficiencia y eligiendo operar el alternador a una salida reducida que coincide con la eficiencia máxima del alternador.

Las curvas de eficiencia se incluyen en la hoja de datos técnicos publicada de cada alternador.

## EFICIENCIA OPERATIVA DE LOS GRUPOS ELECTRÓGENOS

Siempre ha sido importante optimizar la eficiencia operativa general de un grupo electrógeno. Un objetivo para identificar áreas de ineficiencia, asociadas cuando se debe considerar el espectro de entrada de combustible frente a la salida de energía eléctrica, desafía a los ingenieros en muchos campos especializados de ingeniería mecánica y eléctrica.

El trabajo de estos ingenieros debe incluir consideraciones y la debida preocupación con respecto a una amplia base de ingeniería práctica y requisitos legislativos internacionales que pueden obligar a enfatizar los parámetros clave de rendimiento para tener prioridad sobre el logro de una eficiencia óptima.

Incluso el enfoque más simple para contemplar la eficiencia general del grupo electrógeno identifica rápidamente el motor alternativo de combustión interna (motor RIC) como el componente más ineficiente, aceptando que la eficiencia general de los grupos electrógenos mejora a medida que aumentan los niveles de potencia. Aun así, para un motor diesel RIC, la eficiencia operativa cae ampliamente dentro del ancho de banda de 30<40%, con un ancho de banda de eficiencia típico del alternador de 80<97%.