

Guías de Aplicación: Información Técnica de Cummins Generator Technologies

AGN 017 - Cargas Desbalanceadas

Inevitablemente, habrá algunas aplicaciones en las que un grupo electrógeno esté suministrando energía a varias y múltiples cargas que someten al alternador a una situación de carga desbalanceada.

CARGA DE FASE DESIGUAL

Los alternadores pueden estar sujetos a cargas de fase desiguales, pero esto dará como resultado voltajes de fase desiguales. El uso de un AVR de detección trifásica siempre garantizará la mejor regulación de voltaje posible en general y siempre será nominado si se va a usar un alternador para suministrar energía a múltiples cargas donde puede surgir una condición de carga desequilibrada. Para obtener más información y detalles gráficos del rendimiento de los AVR de detección de 2 y 3 fases, comuníquese con applications@cummins.com.

Los efectos de una situación de carga desbalanceada en un alternador pueden ser complicados y se explican en las siguientes dos secciones. La Sección 1 trata de mantenerlo simple y utiliza una combinación de analogías mecánicas y eléctricas para ayudar a transmitir la información técnica. La Sección 2 intenta brindar una apreciación técnica más profunda de lo que sucede dentro del alternador.

SECCIÓN 1

Las cargas monofásicas someten al alternador a una carga eléctrica irregular/pulsante y, por lo tanto, a una demanda desigual de par en los 360° de rotación del rotor y del cigüeñal.

Piense en términos de un motor de cilindros múltiples, pero para condiciones en las que se requiere potencia reducida y el sistema de 'combustible' de este motor no puede alimentar a todos los cilindros. El resultado sería un motor que sería capaz de suministrar la potencia reducida requerida y aun así mantener la velocidad. Sin embargo, la velocidad de rotación del cigüeñal sería "brusca", lo que daría como resultado un motor que funcionaría con altos niveles de vibración torsional, mientras que el conjunto mecánico del motor y el alternador estarían sujetos a altos niveles de vibración física.

Ahora imagine un alternador trifásico [o motor de tres cilindros], conectado a una carga en una sola fase [alimenta combustible a un solo cilindro]. La corriente de fase del alternador y, por lo tanto, la carga estaría dentro de la capacidad de esta fase única al estar dentro de un tercio de la clasificación de diseño trifásico del alternador [o para el motor dentro de la capacidad de solo uno de los 3 cilindros]. El resultado final sería un grupo electrógeno de funcionamiento irregular.

En el mundo de las máquinas eléctricas giratorias, es decir, los alternadores, el efecto de cualquier corriente de carga se puede describir en términos de una "condición de secuencia de fase" [que no debe confundirse con la rotación de fase UVW]. Básicamente, se dice que una carga trifásica equilibrada tiene una condición de Secuencia de fase positiva, las cargas desequilibradas en las tres fases se describen con el término condición de secuencia de fase negativa y un cortocircuito entre las tres fases se describiría como una condición de Secuencia de fase cero.

Cuando un Grupo Generador trifásico está suministrando una carga trifásica equilibrada, la demanda de par del motor es muy equilibrada y prácticamente lineal en los 360° de cada revolución. En una condición de carga desequilibrada, siendo el peor de los casos ausencia de corriente en dos fases y plena corriente nominal en una sola fase, por lo tanto, una carga monofásica, la demanda de par del motor en los 360° de cada revolución está muy desequilibrada.

Simplificado, se puede considerar que para un total de dos tercios de la revolución no se está demandando ninguna potencia. Esto da como resultado que la velocidad circunferencial del rotor varíe en los 360° de cada revolución. A su vez, esto da como resultado que la jaula del amortiguador del rotor se vuelva muy activa, tratando de amortiguar las variaciones de velocidad circunferencial y, bajo niveles extremos de condiciones de secuencia de fase negativa, la jaula del amortiguador de aluminio se volverá "tan activa" que en realidad se derriete.

Consulte el **AGN016 Corrientes de Secuencia de Fase Negativa** para obtener más información.

El AGN016 explica las restricciones de equilibrio de carga que existen para condiciones de secuencia de fase negativa, para cumplir con los estándares de rendimiento del estándar IEC 60034-1. La capacidad real del alternador se extiende más allá de los requisitos de IEC60034-1, para proporcionar la siguiente compensación que se debe invocar para mantener la capacidad de servicio del alternador:

1. Si el alternador se va a aplicar a una carga que está conectada a una sola de las tres fases y neutro, entonces la corriente de carga no debe exceder el 25% de la corriente nominal de salida [I_L].

Nota: el cálculo de kVA es simple; voltaje de fase a neutro (L-N) x corriente.

2. Si el alternador se va a aplicar a una carga que está conectada en solo dos de las tres fases, entonces la corriente de carga no debe exceder el 30 % de la corriente de salida nominal [I_L].

Nota: el cálculo de kVA es simple; voltaje de fase-fase (L-L) x corriente.

Cargas Monofásicas

Al conectar un devanado trifásico en una conexión doble Delta [a veces en zigzag paralelo], las tres fases manejarán una parte de la carga monofásica y la condición de secuencia de fase negativa, o para usar el término técnico: la corriente de secuencia de fase negativa I_2 – se reducirá.

Algunos diseños de alternadores son tales que no es posible reconectar el devanado trifásico para cargas monofásicas. Si se requiere que el alternador funcione con algo de carga trifásica, pero con un alto nivel de carga monofásica en una sola fase, se deben tomar consideraciones muy cuidadosas para garantizar que la situación resultante de la corriente de secuencia de fase negativa [I_2] no dañe el alternador.

Cummins Generator Technologies fabrica alternadores que están diseñados específicamente para operación monofásica. Los números de devanados monofásicos dedicados son 05 y 06. Estos devanados se clasifican después de una cuidadosa consideración de la capacidad de la jaula del amortiguador del rotor.

Es posible reconectar devanados trifásicos de 12 hilos para cargas monofásicas. Cuando se hace esto, se debe reducir la potencia de salida. Los valores nominales monofásicos se pueden ver en las fichas técnicas monofásicas de cada alternador o poniéndose en contacto con applications@cummins.com.

SECCIÓN 2

Esta sección se ofrece como una explicación más técnica de los efectos de las cargas desequilibradas en un alternador y la tensión resultante en los componentes. Se ha escrito en forma de respuestas a las preguntas más frecuentes sobre las cargas desequilibradas y sus efectos en los alternadores.

Pregunta: ¿Qué cálculo se requiere para identificar el nivel de corriente de secuencia de fase negativa [I_2]?

Respuesta: Podríamos decir que este cálculo se entiende mejor leyendo libros de texto de diseño de máquinas eléctricas. Los cálculos se basan en la relación del ángulo de fase de

todos los componentes y conjuntos del alternador involucrados y, luego, en el uso matemático extensivo del operador 'J'/cálculos basados en la notación 'J' para identificar las resultantes y sus efectos. Para una guía razonada sobre métodos de cálculo sin demasiada consideración detallada de las complejidades, consulte AGN016 Corriente de Secuencia de Fase Negativa.

Pregunta: Explique con más detalle la forma en que las corrientes I_2 se generan realmente en el rotor.

Respuesta: Cuando un alternador está bajo carga, existe un ángulo de carga interno de la posición mecánica real y física del rotor en relación con la posición efectiva del flujo magnético que emana de la cara del polo del rotor, en comparación con el estado/nivel de forma de onda de voltaje generado resultante en el devanado del estator.

Bajo cargas trifásicas equilibradas de estado estacionario a plena carga, este ángulo es (prácticamente) constante y el rotor está típicamente 35 grados eléctricos avanzado mecánica/físicamente de esa forma de onda de voltaje generada instantáneamente. En otras palabras, el cigüeñal del motor y el rotor acoplado están unos 17,5 grados mecánicos por delante de la forma de onda del voltaje generado.

Para simplificar, suponga que es una relación proporcional, carga cero + cero grados de ángulo de carga; media carga = la mitad de los 35 grados eléctricos, etc. Los grados mecánicos reales son la mitad de los grados eléctricos porque es un diseño de generador de cuatro polos. En esta condición de estado estable, el flujo del entrehierro del rotor gira en fase con el rotor y la condición se describe como condición de 'secuencia de fase positiva' [I_1] sin 'deslizamiento'.

Reduzca o aumente la carga equilibrada real y habrá un cambio en el ángulo de carga operativo interno del alternador y esto dará como resultado un "deslizamiento del rotor" momentáneo dentro del campo de flujo magnético establecido, en relación con el nivel de funcionamiento de estado estable de la carga original y ángulo de carga. Debido a que se produce el "deslizamiento" del rotor, a medida que se establece el nuevo ángulo de carga, se induce un voltaje en la jaula del amortiguador y, por lo tanto, la corriente fluye a través de la jaula del amortiguador del rotor. El resultado neto de la corriente de la jaula del amortiguador es un flujo complejo causado por la corriente en las barras frontales de los polos del amortiguador, que trabaja en contra de la reacción del inducido de las corrientes de carga y el flujo del entrehierro original que genera el voltaje de salida y toda esta 'mezcla' en el aire del entrehierro del rotor/estator. El flujo resultante de la actividad de la jaula del amortiguador actúa para generar un par de 'amortiguación mecánica' y esto 'amortigua' las oscilaciones rotatorias +/- del rotor a medida que se asienta en su nueva posición de desplazamiento del ángulo de carga.

Ahora imagine que el alternador no está suministrando una carga trifásica equilibrada, sino diferentes corrientes de carga que fluyen en cada fase. El ángulo de carga del rotor operativo requerido será diferente para cada una de las diferentes corrientes de fase [cargas]. Pero al menos las tres fases están cargadas, por lo que el rotor tiene un ángulo de carga continuo, pero diferente, para cada una de las tres fases de cargas desequilibradas.

Ahora vaya a la condición extrema de que solo se cargue una fase y el ángulo de carga del rotor sea efectivamente cero grados eléctricos cuando esté alineado para las dos fases descargadas y luego "empujado" al ángulo de carga requerido cuando esté alineado con la fase cargada. Entonces, para una máquina de cuatro polos, a 1500 rpm para una salida de 50 Hz, generando así dos ciclos de voltaje en cada revolución, el ángulo de carga del rotor cambiará considerablemente ocho veces en cada revolución.

Esta es la razón por la que un grupo electrógeno que alimenta una carga monofásica tiene niveles de vibración entre un 20 % y un 30 % superiores a los de un generador que alimenta una carga trifásica equilibrada. También es la razón por la que un motor que entrega un nivel dado de kWm para una carga trifásica balanceada funcionará con temperaturas de gas de escape más bajas y una mejor economía de combustible que cuando entrega exactamente los mismos kWm a la demanda de potencia pulsante de una carga monofásica.

Pero si los devanados trifásicos están conectados a una conexión como Doble Delta, entonces al menos las tres fases están transportando corriente y contribuyendo así a la salida monofásica requerida. Sin embargo, la corriente a través de las fases que forman la mayor parte del circuito delta tienen corriente de origen de carga 'halada' a través de ellas fuera de fase con el voltaje que se genera en ellas. Esto conduce a consideraciones más complejas de lo que sucede dentro de los componentes del estator y el rotor del generador y se requieren más cálculos de notación J para calcular el efecto resultante en la clasificación y capacidad de los componentes individuales.

Pregunta: ¿Cómo se inducen las corrientes en la jaula del amortiguador del rotor?

Respuesta: Se induce voltaje en cualquier conductor si se mueve en ángulo recto a través de un campo magnético. Para un conductor dado, cuanto más rápido atraviesa el flujo magnético, mayor es el nivel de voltaje generado. Cuando el rotor funciona en condiciones de carga equilibrada en estado estable, el campo magnético del flujo del rotor se mueve exactamente a la misma velocidad que el rotor y, por lo tanto, en términos relativos, la velocidad de corte del flujo es cero con respecto a la jaula del amortiguador. En el momento en que el rotor se ralentiza o acelera, debido a un aumento o disminución de la carga, el ángulo de carga operativo original debe cambiar y eso significa que la jaula del amortiguador se mueve repentinamente a través del campo/flujo magnético fundamental en el espacio de aire entre el estator y rotor. Este movimiento relativo a través del flujo genera un voltaje en la jaula del amortiguador, tal como lo pretendía el diseñador y, a medida que los extremos de las barras se sueldan entre sí, la corriente fluye a través del conjunto de la jaula del amortiguador para generar flujo, que a su vez proporciona un par de amortiguación dentro de la 'jaula amortiguadora' para ayudar con la realineación mecánica 'controlada y amortiguada' del rotor a la posición de ángulo de carga ahora requerida.

Pregunta: ¿Por qué el AVR no puede reducir el campo magnético giratorio para la parte del ciclo del rotor cuando está alineado con las dos fases descargadas?

Respuesta: Aunque la electrónica dentro del AVR tiene una constante de tiempo de microsegundos, el campo magnético de un alternador funciona con constantes de tiempo mucho más largas/más lentas. Normalmente, la constante de tiempo del excitador, que es

suministrada por el AVR, es de unos 80 ms, mientras que el rotor principal, que es "impulsado" por la salida del excitador, tarda unos 250 ms en realizar un cambio real en los niveles de flujo de funcionamiento. Por lo tanto, el sistema de excitación completo del alternador es demasiado lento para realizar los cambios necesarios en los tiempos requeridos para ayudar con una condición de secuencia de fase negativa, que ocurre cuatro veces cada ciclo de voltaje de CA [20 ms] y no en cuatro espacios de tiempo uniformes.

Pregunta: Algunos fabricantes de alternadores sugieren tomar la monofásica de 240 V de solo dos fases. ¿Es esto correcto?

Respuesta: Usar solo dos fases de un alternador trifásico debe ser una situación de compromiso. Puede basarse en que el alternador esté diseñado para operar a 480 V trifásico [277 V, L-N] en serie en estrella y luego capaz de ofrecer 240 V en dos fases una vez que el alternador se haya conectado en paralelo en estrella, porque la mitad de 480 V es 240 V. Este método de cargar dos de las tres fases tiene que ser una mejora con respecto a la carga de una sola fase del devanado trifásico para proporcionar una salida monofásica.

Pero la configuración de doble delta carga las tres fases y todos los fabricantes de alternadores han demostrado que es la mejor forma de compromiso para volver a condiciones casi equilibradas dentro de un alternador trifásico cuando se conecta una carga monofásica. En la conexión Doble Delta, los devanados de fase en la mayor parte del circuito delta manejan alrededor del 40% de la corriente de carga total, con la fase 'maestra' en la parte I del delta manejando alrededor del 60% de la salida monofásica total.

Pregunta: ¿Qué pasa con los alternadores equipados con un devanado monofásico dedicado?

Respuesta: Un estator equipado con un devanado monofásico dedicado tiene un tercio de las ranuras del devanado del estator vacías. Esto significa que hay mucho más espacio para que el aire de refrigeración viaje por el centro del alternador en el espacio entre el rotor y el estator. Este aumento de aire de enfriamiento fluirá sobre las caras polares del rotor y reducirá la temperatura de trabajo de la cara polar del rotor y, por lo tanto, la jaula del amortiguador. Este enfriamiento adicional se tiene en cuenta cuando se diseña el alternador monofásico y se identifican los ratings de salida del alternador.

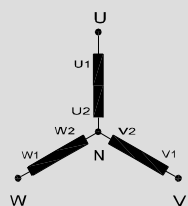
ESQUEMAS DE CONEXIÓN

Configuraciones de devanado y números de devanado.

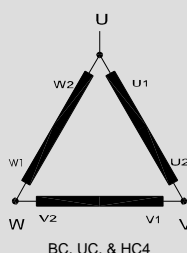
Conexiones de 6 hilos.

Los devanados del estator números 12/312, 13, 07 y 26 son los devanados más comunes con 6 cables de salida del estator que se introducen en la caja de terminales. Los 6 cables normalmente se conectan en una configuración en estrella, aunque es posible conectar los cables en una configuración en triángulo si se establece el requisito en el momento del pedido. No es posible la reconexión de Estrella a Delta o de Delta a Estrella.

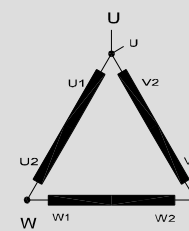
Star 3Ph 4W
Output Terminals (U.V.W.N.)



Delta 3Ph 4W
Output Terminals (U.V.W.)



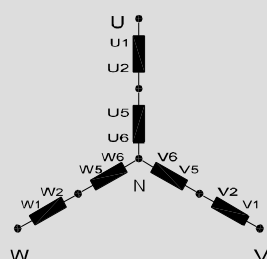
Delta 3Ph 4W
Output Terminals (U.V.W.)



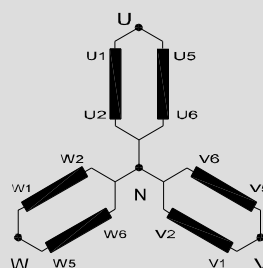
12 hilos reconectables.

Los devanados del estator números 11/311, 14, 17 y 25 son los devanados más comunes con 12 cables de salida del estator que se introducen en la caja de terminales. Los 12 conductores normalmente se conectan en una configuración de estrella en serie, pero se pueden conectar en estrella paralelo o en serie triángulo, según el voltaje de suministro de salida requerido. Es posible la reconexión a configuraciones para Serie Estrella, Serie Delta o Paralelo Estrella.

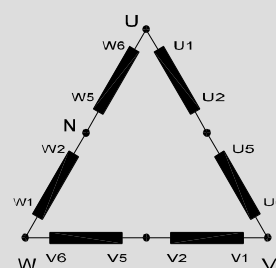
Series Star 3Ph 4W
Output Terminals (U.V.W.N.)



Parallel Star 3PH 4W
Output Terminals (U.V.W.N.)

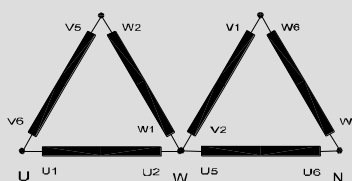


Series Delta 3Ph 4W
Output Terminals (U.V.W.N.)



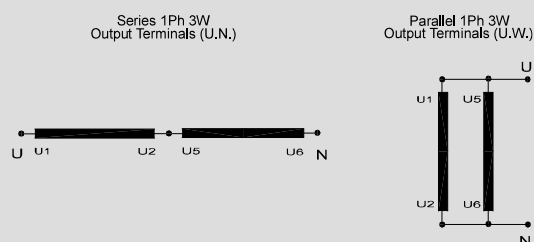
También es posible conectar devanados de estator de 12 hilos para operación monofásica en la configuración de doble delta.

Double Delta 1Ph 3W
Output Terminals (U.W.N.)
(BC/UC only)



4 hilos dedicados.

Los devanados del estator números 05 y 06 están diseñados específicamente para operación monofásica y no se pueden volver a conectar para alimentación trifásica. El devanado 05 está dedicado a tensiones de 50 Hz y el devanado 06 está dedicado a tensiones de 60 Hz.



REFERENCIAS

Una investigación sobre las diversas Normas aplicables ha dado como resultado las siguientes observaciones:

ISO 8528 Parte 3. Sección 8.11 Identifica el desequilibrio de voltaje $\delta U_{2.0}$ (relación de los componentes de voltaje de secuencia negativa o de secuencia cero al componente de voltaje de secuencia positiva sin carga. El desequilibrio de voltaje se expresa como un porcentaje del voltaje nominal). Luego, la Tabla 1 identifica las expectativas para los "valores límite operativos" para la clase de rendimiento: G1, G2, G3 y G4, cada uno de estos requiere que $\delta U_{2.0}$ (ver arriba) esté dentro del 1 % sin condiciones de carga.

ISO 8528 Parte 3. Sección 10.1 Corriente de carga desequilibrada. El alternador deberá ser capaz de operar continuamente con una Corriente de Secuencia de Fase Negativa hasta e incluyendo el 10% de la corriente nominal.

IEC 60034-1. 7.2 Forma y simetría de tensiones y corrientes.

7.2.2 Generadores de CA. Los generadores de CA trifásicos deben ser adecuados para alimentar circuitos, que prácticamente no se deforman y están prácticamente equilibrados, es decir, el voltaje de salida sinusoidal del generador cuando se aplica a dicha carga puede dar como resultado corrientes de fase desequilibradas de $< \pm 5\%$, y el componente de secuencia negativa resultante o el componente de secuencia cero no debe exceder el 5%.

7.2.3 Tabla 2 – Condiciones de funcionamiento desequilibradas para máquinas síncronas. Esta tabla establece que los generadores enfriados indirectamente, por ejemplo: ventilación abierta estándar - IC01, deberán ser capaces de operar continuamente con una carga desequilibrada donde el componente de secuencia negativa I_2 / I nominal no debe exceder el 8%.

NEMA MG1 Parte 20. Máquinas Grandes – Máquinas de Inducción. 20.24 Efectos de los voltajes desequilibrados en el desempeño de los motores de inducción de jaula de ardilla polifásicos. Esto identifica los problemas asociados y muestra un gráfico con exactamente el mismo factor de reducción que en 00/203105. En resumen: con un desequilibrio de tensión aplicado de más del 1 %, se debe introducir un factor de reducción, y el gráfico indica un factor de reducción hasta el 5 % de desequilibrio de tensión de fase, donde el factor de reducción es 0,75.

NEMA MG1 parte 32. Generadores síncronos. 32.14 Desequilibrio de corriente continua.
 I_2 admisible para un generador con devanado amortiguador interconectado = 10%.

CONCLUSIÓN

Aunque en la Tabla 1 de ISO 8528-3 se encuentra una guía con respecto al desequilibrio de voltaje de fase sin carga, que debe estar dentro del 1%, no se pudo encontrar ningún estándar que estipulara un nivel máximo permitido de desequilibrio de voltaje de fase a fase en términos porcentuales para fines prácticos como guía para una condición en carga.

Por las razones descritas en IEC 60034 – 1, son las características de la carga desequilibrada conectada las que obligan a los voltajes de fase a desequilibrarse, pero el estándar de ingeniería no llega a cuantificar un desequilibrio máximo permitido en términos prácticos de V %.

En cambio, se ofrece una guía en forma de nivel máximo recomendado de corrientes de fase desequilibradas, y esto se identifica como el porcentaje de los componentes de secuencia negativa I_2 y secuencia cero I_0 con respecto a la corriente nominal I_N del alternador.

Esto tiene mucho sentido, porque el efecto de cualquier tensión de fase desequilibrada sería promover corrientes de fase desequilibradas. Y es el nivel de corrientes de fase desequilibradas lo que hace que los componentes del alternador [y del motor] se estresen térmicamente, y su diseño esté sujeto a operar con desequilibrio; condiciones de pulsación continua.

Al considerar los niveles porcentuales de I_2 que se estipulan existen diferencias, pero los alternadores se diseñan con niveles de capacidad superiores al 8% en IEC 60034 y al 10% en NEMA e ISO 8528-3, considerándose aceptable esta ligera disparidad.

Cualquier laico que utilice los estándares como documento de referencia para un campo en el que tiene una experiencia limitada, es poco probable que el uso de componentes de secuencia cero y negativos sea de ayuda inmediata, aunque se beneficiará de la exposición a los términos técnicamente correctos.

Un estándar realmente útil tendría una tabla de los niveles reales de desequilibrio de corriente de fase y un factor de reducción asociado similar al gráfico NEMA en la Parte 20.