

AGN 025 – Cargas No Lineales

DESCRIPCIÓN

Una carga No Lineal [NLL] es una carga con características de consumo de corriente que no siguen (imitan) la misma forma fundamental que la forma de onda del voltaje aplicado. Técnicamente, esta situación se examina realizando un análisis de armónicos de tensión y corriente. Estos datos proporcionan detalles de los armónicos de corriente predominantes y la distorsión armónica resultante de la forma de onda del voltaje aplicado.

Hay muchas cargas no lineales comúnmente encontradas. Hay NLL que consumen corriente continua, por ejemplo, unidades de iluminación asociadas con lámparas de descarga y luego corriente discontinua asociada con dispositivos electrónicos de potencia.

Las Cargas No Lineales más problemáticas incorporan dispositivos electrónicos de potencia. Los ejemplos son: puentes de tiristores controlados por fase, transistores (transistores bipolares de puerta aislada (IGBT) o diodos) como en un puente no controlado. Todos estos dispositivos generarán una distorsión de corriente armónica, que a su vez distorsionará la forma de onda del voltaje de CA aplicado.

A menudo nos preguntan qué nivel de 'factor de sobredimensionamiento' se debe utilizar al ofrecer un grupo electrógeno para cargas como unidades de velocidad variable (VSD), fuente de alimentación ininterrumpida (UPS) o incluso un sistema de iluminación de un estadio deportivo, donde todos introducen preocupaciones con respecto a los niveles operativos del sistema de distorsión armónica.

La respuesta corta es que no existe un único "factor de sobredimensionamiento" adecuado para cubrir todas las aplicaciones que involucran cargas que generan distorsión armónica.

Cada consideración de aplicación debe comenzar estableciendo una comprensión de las características operativas del equipo NLL propuesto en términos del nivel de distorsión de corriente armónica, además de la identificación del nivel de kVA de estado estable y pico de la carga total conectada. Como hay muchos tipos de NLL que dan como resultado muchas características de funcionamiento diferentes, se calcula que habrá muchos factores de sobredimensionamiento.

Debe tenerse en cuenta que al considerar las características de un variador de velocidad [VSD] o un sistema de alimentación ininterrumpida [UPS], son las características de la etapa del convertidor las que afectan al alternador. Lo que sucede en la etapa del inversor es de interés, pero bien puede tener poco efecto en el nivel resultante de distorsión armónica de voltaje generada dentro de la forma de onda de voltaje aplicada desde la fuente de alimentación (alternador).

Si se permite que el nivel de distorsión de forma de onda de voltaje armónico sea demasiado alto, se producirá un mal funcionamiento del sistema electrónico de potencia NLL o inestabilidad del sistema de excitación del alternador.

Las cargas no lineales ahora son un lugar común y, por lo tanto, los alternadores están disponibles "adecuados para el propósito". Un sistema de excitación adecuado estará disponible, a veces listado como un extra opcional, o incluso un kit de actualización, que mantendrá un voltaje de salida RMS generado estable, a pesar de la distorsión de la forma de onda del voltaje causada por el NLL. Sin embargo, la experiencia sugiere que mucho antes de que un alternador correctamente especificado tenga problemas con la distorsión armónica, los dispositivos electrónicos de potencia del NLL y su sistema de control de ángulo de fase asociado comenzarán a funcionar mal.

DIMENSIONAMIENTO DE UN ALTERNADOR PARA ALIMENTACION DE CARGAS NO LINEALES

Hay una ruta lógica que proporcionará una solución de ingeniería para la nominación de un alternador adecuado para cualquier aplicación en la que se deban considerar cargas complejas, incluidas las NLL. La siguiente explicación describe una ruta que se ha dividido en partes en un intento de proporcionar una comprensión progresiva de los problemas involucrados.

Parte 1. Fundamentos

Debe aceptarse que cuando se alimenta una carga con una distorsión inherente de la forma de onda de corriente, la forma de onda de la tensión de alimentación se verá afectada y, por lo tanto, también se distorsionará armónicamente. Por lo tanto, siempre se debe considerar la identificación de un nivel aceptable de distorsión armónica de voltaje. Muchos tipos de equipos eléctricos tienen una tolerancia finita a una forma de onda de voltaje distorsionada por encima de la cual es probable que el equipo funcione mal o que se produzca una falla en los componentes.

Una vez que se han identificado los niveles porcentuales de distorsión armónica total (THD%) para la forma de onda de corriente y voltaje, se pueden considerar completamente las características operativas de la fuente de alimentación eléctrica requerida y así puede comenzar el ejercicio de nominación del alternador.

Un enfoque fundamental consiste en considerar la relación entre la distorsión armónica de la corriente, la distorsión armónica del voltaje y, a su vez, la impedancia de la fuente de la fuente de alimentación (alternador) en términos de la Ley de Ohmios.

Dónde; la impedancia de la fuente de suministro $R = V.\text{dist}\% / I.\text{dist}\%$

Para un alternador, el parámetro que mejor 'describe' la impedancia de la fuente para considerar la distorsión de la forma de onda del voltaje es la reactancia subtransitoria X''_d .

Este enfoque básico, simplemente proporciona una comparación de relaciones como una ruta para identificar un nivel adecuado de impedancia del alternador (en realidad, reactancia subtransitoria) y, por lo tanto, una guía de 'regla general' con respecto al nivel de 'especialidad' requerido al comparar el 'alternador especial' con la combinación de motor-alternador estándar de un grupo electrógeno para aplicación industrial.

Por lo menos, esto explica la importancia de recopilar datos sobre las características NLL y luego considerar también las necesidades de **todas** las cargas conectadas antes de que pueda comenzar la búsqueda del dimensionamiento y la nominación del alternador.

Parte 2.1. Tipos de cargas NLL y características típicas para la distorsión armónica de forma de onda actual de corriente

Algunas cargas eléctricas consumen corriente continua durante el período de cada media onda de voltaje aplicada, pero debido a su comportamiento complejo de consumo de corriente, lo que da como resultado la generación de una forma de onda de corriente compleja con órdenes armónicos individuales, que se combinan para dar a la forma de onda de corriente fundamental con un alto contenido armónico. Un ejemplo de tal carga es:

- Lámparas de descarga.

Algunas cargas eléctricas consumen corriente discontinua para cada media onda de tensión aplicada. Tales cargas incorporan paquetes electrónicos de potencia. La acción de esta corriente discontinua es generar un nivel pronunciado de distorsión armónica que puede variar considerablemente a medida que los kVA absorbidos varían en el rango de operación del equipo. Los siguientes son tipos comunes de cargas no lineales que incorporan dispositivos electrónicos de potencia:

- Rectificadores
- Sistemas UPS
- Variadores de Velocidad (VSD) y Variadores de Frecuencia (VFD)
- Sistemas de Arranque Suave
- Fuentes de alimentación conmutadas

Obtener datos sobre las características de distorsión de corriente armónica de una carga propuesta puede ser difícil, por lo que la siguiente sección proporciona preguntas clave y luego sugerencias sobre valores típicos en caso de que sea necesario hacer suposiciones.

Parte 2.2. Un cuestionario para identificar las características técnicas de las NLL

Para establecer niveles aceptables de distorsión de forma de onda de voltaje, es importante conocer el tipo de NLL que se va a alimentar. Se requieren los siguientes detalles sobre las características de la NLL;

- Número de pulsos asociados a la etapa del convertidor. Esto es normalmente 6 o 12.
- Nivel [%] de distorsión armónica de corriente generada por la NLL.
- ¿Están instalados filtros armónicos para reducir el nivel de distorsión de corriente?
- Nivel máximo aceptable de distorsión armónica de Tensión.
- Si es UPS, la entrada máxima en condiciones de recarga de la batería.
- Si VSD/VFD, la condición de kVA pico de arranque del motor.
- Voltaje y Frecuencia de Operación.
- Factor de potencia de operación y eficiencia.

Cuando no se pueden obtener datos reales, se deben hacer suposiciones y lo siguiente ofrece valores típicos para los tipos de NLL.

Niveles típicos de Distorsión Armónica de Corriente

La Distorsión de Corriente en una NLL se refiere a THDi o Idist y se da como un porcentaje:

- 12 pulsos - 14% (también se considera apropiado para los IGBT modernos)
- 6 pulsos - 30%
- 4 pulsos - 45% (equipos monofásicos)

Niveles Típicos Aceptables de Distorsión Armónica de Voltaje Total

Si no se pueden proporcionar niveles específicos para la distorsión armónica del voltaje del sistema, entonces se pueden asumir los siguientes niveles típicos, pero el cliente debe saber que las suposiciones ahora reemplazan los datos reales de ingeniería.

La distorsión de voltaje creada por un NLL se refiere a THDv o Vdist y se da como un porcentaje:

- Sistemas UPS - 10%
- Inversores - 15%
- Arranques Suaves - 20%
- Rectificadores - 20%

Parte 3. Comportamiento de Cargas No Lineales y Alternadores

El alternador elegido debe tener una "impedancia de fuente" lo suficientemente baja para garantizar que el nivel resultante de distorsión de voltaje armónico del sistema sea aceptable

para la NLL y esto también puede significar aceptable para cualquier carga "normal" que se suministre.

Como regla general, las siguientes fórmulas básicas se pueden utilizar para obtener una apreciación del comportamiento de las cargas no lineales y los alternadores.

Debe aceptarse que estas 'Reglas generales' no deben utilizarse indebidamente al hacer promesas garantizadas a los clientes en función de las respuestas proporcionadas por cada regla simple, ni debe llevarse la respuesta a un número más allá de un decimal y la respuesta siempre debe ser redondeado hacia arriba en lugar de hacia abajo cuando se aplica al proceso de selección del alternador.

Regla General

Esta regla ayuda con la identificación del nivel requerido de impedancia de la fuente del alternador, medida por el nivel requerido de reactancia subtransitoria (X''_d) para el alternador bajo consideración, para lograr el nivel requerido de distorsión armónica de voltaje. Recuerde que el alternador siempre se debe nominar en función de una clasificación de clase 'F' (105/40 °C) para garantizar que el efecto de calentamiento adicional de los armónicos no obligue al alternador a operar por encima del límite térmico de clase H (180 °C) para el sistema de aislamiento.

$$X''_d\% = (V.\text{dist}\% / I.\text{dist}\%) \times (P_n / 6) \times 10$$

Donde:

X''_d : reactancia subtransitoria requerida para el alternador propuesto.

V.dist%: nivel de distorsión armónica de voltaje requerido.

I.dist%: nivel de distorsión armónica de corriente a la que la NLL opera.

P_n : es el número de pulsos asociados con la etapa del convertidor de la NLL.

Ejemplo:

La NLL es de 6 pulsos, con 30 % de I.dist. y un nivel específico de V.dist. al 10 %:

$$X''_d\% = (V.\text{dist}\% / I.\text{dist}\%) \times (P_n / 6) \times 10$$

$$X''_d\% = (10 / 30) \times (6 / 6) \times 10$$

$$X''_d\% = 0.33 \times 1 \times 10$$

$$X''_d\% = 3.3\%$$

La clasificación de aumento de temperatura de Clase 'F' [105/40] del alternador tendrá una X''_d superior al 3,3%, generalmente alrededor del 12%. Será necesario reducir la salida de kVA del alternador para reducir el X''_d a 3,3%.

Transponiendo la fórmula, se puede calcular el nivel de V.dist% para una situación en la que el alternador $X''_d\%$ ya se conoce;

$$V.\text{dist}\% = (X''d\% \times I.\text{dist}\% \times 6) / (10 \times 6)$$

Basado en el uso de los mismos valores:

$$V.\text{dist}\% = (3.3 \times 30 \times 6) / (10 \times 6)$$

$$V.\text{dist}\% = 10\%$$

Parte 4: Consideraciones asociadas al alimentar NLL

Por lo tanto, la nominación de un alternador "adecuado para el propósito" comienza con la consideración de las características de NLL. Esto incluye la identificación de los kVA de entrada y el nivel típico de distorsión de corriente armónica. Esta información luego se calcula contra la 'impedancia de la fuente del suministro' y para un alternador, esto significa considerar el valor de la reactancia subtransitoria del alternador [$X''d$].

Una vez que se ha identificado el alternador correcto, se puede incluir el sistema de excitación apropiado en la especificación final del alternador. El sistema de excitación debe incluir tecnología de Devanado Auxiliar o un PMG y MX321 AVR o DM110 AVR, según corresponda.

Consideraciones térmicas: el efecto de calentamiento de los armónicos

La distorsión armónica como resultado de las cargas no lineales generará un calentamiento adicional en el sistema de suministro de energía que se utiliza para soportarlas. Los armónicos de corriente harán que fluya corriente adicional que no produce energía y, como resultado; aumentará el calentamiento en todos los cables de alimentación y, por supuesto, en los devanados del estator del alternador.

El efecto de la corriente adicional [armónica] que fluye a través de los devanados del estator dará como resultado una mayor reacción del inducido dentro del alternador y esto requerirá que el sistema de excitación del alternador opere a niveles más altos que los esperados normalmente, con el resultado de los devanados del rotor principal más caliente de lo esperado.

Un problema secundario de este efecto es que la jaula del amortiguador también puede verse afectada por los armónicos, lo que puede provocar que una corriente continua inesperada fluya a través de la jaula del amortiguador y, por lo tanto, más calor.

El efecto de la distorsión armónica de voltaje resultante que ocurre en la forma de onda de voltaje generada será que estos voltajes más altos que los fundamentales promuevan un calentamiento adicional dentro del acero laminado del estator.

El efecto combinado del calentamiento adicional debido al alternador que alimenta un NLL depende en gran medida del nivel de armónicos presentes en el sistema y todos sabemos que esto es directamente proporcional a las características de NLL, combinado con la fuente Impedancia de alimentación, que siempre relacionamos con el valor de la $X''d$ del alternador.

Por esta razón, la carga continua total nunca debe exceder la clasificación de aumento de temperatura Clase 'F' [105/40] del alternador.

Esto dará como resultado que el efecto de calentamiento total real dentro del alternador sea tal que el estator del alternador y los componentes del rotor funcionarán a temperaturas justo por debajo de un nivel de clasificación Clase 'H'.

Sistema de Excitación:

Para garantizar que el sistema de excitación del alternador permanezca estable bajo los niveles impuestos de distorsión armónica creada por la NLL, se debe incorporar una fuente de alimentación aislada y estable dentro del alternador para proporcionar al AVR una fuente de alimentación de excitación. Idealmente, esto debería basarse en un excitador piloto PMG, aunque un devanado de estator auxiliar bien diseñado puede proporcionar niveles aceptables de desempeño.

NLL con filtros de armónicos:

Los filtros de armónicos diseñados para reducir el nivel efectivo de distorsión armónica del sistema están disponibles específicamente para las características de cada tipo de NLL. La última tecnología se basa en 'Filtros-Activos', que son sistemas activos de compensación de armónicos con la capacidad de mantener el voltaje prácticamente en una onda sinusoidal pura. El funcionamiento de NLL junto con el filtro activo funcionará muy cerca de un F.p. igual a 1, por lo que las nominaciones de motores deben tener esto en cuenta.

Los paquetes de filtros de armónicos tradicionales bien diseñados consisten en una combinación de condensadores e inductores como circuito LC sintonizado. Es probable que los filtros de bajo costo sean solo capacitores, y estos pueden causar problemas operativos para el sistema de excitación del alternador, debido a un efecto de autoexcitación si la carga total conectada se convierte en una condición de factor de potencia muy importante (kVAr en adelanto). La mayoría de los alternadores solo pueden tolerar un valor bajo de kVAr en adelanto (corriente capacitiva de adelanto Z_{pf}) y, por lo general, esto es del orden del 25 % de los kVA nominales industriales del alternador.

Por lo tanto, la inclusión de cualquier forma de paquete de filtro de armónicos requiere una consideración técnica para garantizar que no ocurran problemas durante el "arranque" de la NLL, cuando la potencia activa es prácticamente cero y el alternador puede estar suministrando solo una carga con f.p. en adelanto.

Parte 5: Dimensionamiento del alternador

En esta etapa, es importante tener en cuenta que la NLL siempre será la parte más susceptible del paquete del equipo del sitio si se permite que ocurran niveles inaceptablemente altos de distorsión armónica del voltaje del sistema de suministro. Nunca es un mal funcionamiento de un Grupo Generador del "tamaño" correcto.

En esta etapa, ahora tenemos la información clave con respecto a los parámetros operativos. Hemos recopilado y considerado datos para la NLL y las cargas normales (lineales). Hemos aplicado niveles típicos aceptables de distorsión armónica del sistema cuando no hay información disponible. Hemos determinado el nivel requerido de impedancia de fuente del alternador calculando la reactancia subtransitoria del alternador (X''_d). Y hemos considerado la especificación de diseño del alternador. Ahora podemos concluir el proceso de "dimensionamiento del alternador".

El "enfoque de nivel básico" cubierto en la Parte 1 tiene una fórmula que introduce el término R como una ruta para proporcionar una indicación de la impedancia de la fuente de alimentación (alternador). Cuando el nivel de distorsión armónica de corriente es alto pero el nivel requerido de distorsión armónica de voltaje es bajo, entonces la impedancia de la fuente del sistema de suministro debe ser muy baja. En términos prácticos, esto significa que se debe seleccionar un alternador con niveles muy bajos de reactancia, de este modo se logrará un nivel muy bajo de reactancia subtransitoria $X''d$.

Los ingenieros utilizan cálculos complejos para considerar el efecto de los niveles de distorsión armónica de voltaje y corriente, la impedancia del sistema de distribución y la consecuencia de las cargas lineales operativas que inevitablemente compartirán el sistema eléctrico. Sin embargo, en un intento por mantenerlo simple, aplicamos un enfoque sencillo de dos pasos. En primer lugar, en la Parte 3, calculamos un valor de $X''d$. Ahora, en segundo lugar, debemos relacionar esta $X''d$ con una ruta para la nominación del alternador.

El valor $X''d\%$ en la Parte 3 ahora debe corregirse al nivel de kVA base de los kVA de entrada de la NLL. Este es un cálculo simple de "corrección" para identificar el nivel de kVA base de la NLL:

(kVA de entrada NLL / kVA publicados del alternador para el valor publicado de $X''d$) x valor publicado de $X''d$.

Para ilustrar de manera más efectiva el proceso de dimensionamiento, es mejor usar un ejemplo:

Ejemplo: Sistema de 415 V 50 Hz, una carga mixta de unos 450 kVA que incluye un UPS identificado con una demanda de entrada máxima de 300 kVA, 6 pulsos con una distorsión de corriente armónica del 30 % y el nivel máximo recomendado de distorsión de tensión armónica es del 10 %.

Consideraciones de impedancia de la fuente:

El alternador debe tener una clasificación de aumento de temperatura Clase F de al menos 450 kVA, por lo que este es un punto de partida fundamental para la consideración del alternador:

De nuestro ejemplo en la Parte 3, sabemos que el alternador requerirá que $X''d$ no supere el 3,3 %.

De un archivo de datos, se encuentra un alternador con una clasificación de aumento de temperatura Clase F de 475 kVA, con un $X''d$ identificado de 12 % para esta clasificación base a 415 V 50 Hz

Ahora corregimos esta $X''d$ publicada para la clasificación 'F' a una recalculada para $X''d$ contra el rating base asociado con los kVA de entrada del UPS:

$$\text{UPS nivel base } X''d = (300/450) \times 12\% = 8\%$$

Como el alternador requerido debe tener un $X''d$ de hasta 3,3%, este alternador no es adecuado.

De un archivo de datos, se selecciona otro alternador. Este alternador tiene una clasificación de Clase 'F' de 850 kVA y una $X''d$ publicada de 9 % a 415 V 50 Hz.

De nuevo, corregimos esta $X''d$ publicada para la clasificación 'F' a una recalculada para $X''d$ contra el rating base asociado con los kVA de entrada del UPS:

$$\text{UPS nivel base } X''d = (300/850) \times 9\% = 3.2\%.$$

Este alternador es adecuado.

Consideraciones del Sistema de Excitación:

El alternador debe estar equipado con un sistema de excitación y AVR adecuado, especificando la necesidad de una fuente de alimentación aislada para el AVR preferiblemente mediante un excitador piloto PMG, alternativamente un sistema de bobinado auxiliar del estator.

Ahora se deben tener ciertas consideraciones prácticas con respecto al diseño del grupo electrógeno:

Como el alternador seleccionado correctamente es un diseño de 850 kVA, la aplicación se identifica como 450 kVA, por lo que todo lo que se necesita es un motor adecuado para un grupo electrógeno de 450 kVA. La falta de coincidencia entre un alternador grande y un motor pequeño obliga al diseñador del grupo electrógeno a considerar un diseño especial del bastidor base del alternador del motor, la compatibilidad torsional, el par del motor de arranque, los niveles altos de corriente de falla inherentemente del alternador, un sistema de protección eléctrica y esquema de instalación en el lugar, que considerará debidamente los niveles de distorsión armónica operacional y cualquier contravención de EMC resultante.

Con base en el cálculo anterior, la siguiente lista proporciona valores de referencia típicos para aplicaciones NLL:

Considere una NLL sin filtrar de 6 pulsos con un 30% de distorsión de corriente armónica:

Para operar con la distorsión armónica de voltaje en la región del 10%, entonces $X''d \sim 3.3\%$

Para operar con la distorsión armónica de voltaje en la región del 15%, entonces $X''d \sim 5.0\%$

Para operar con la distorsión armónica de voltaje en la región del 20%, entonces $X''d \sim 6.7\%$

Considere un NLL sin filtrar de 12 pulsos con una distorsión de corriente armónica del 14%:

Para operar con la distorsión armónica de voltaje en la región del 10%, entonces $X''d \sim 14\%$

Para operar con la distorsión armónica de voltaje en la región del 15%, entonces $X''_d \sim 21\%$

Parte 6: Alternadores existentes y antiguos

Identificar la capacidad de los alternadores existentes/antiguos para admitir las NLL recién instaladas requiere que se recopile y se tenga en cuenta toda la información operativa descrita anteriormente para la NLL propuesta. Luego, esta información debe compararse con el valor de la reactancia subtransitoria [X''_d] del alternador existente calculada con un "nivel base" para los kVA operativos de la NLL propuesta.

Si es probable que la NLL genere un nivel de distorsión de tensión armónica superior al 5 %, será necesario equipar el alternador con un sistema de excitación que esté aislado de las conexiones de salida principal del alternador. En el caso de un alternador STAMFORD, esto se puede lograr mediante la instalación de un PMG y AVR MX321 o tipo digital.

CONCLUSIÓN

La explicación técnica anterior se ha mantenido deliberadamente en un nivel que proporciona una explicación simple, que con suerte eliminará parte del misterio que a menudo rodea el ejercicio de dimensionamiento de un grupo electrógeno, cuando se especifican combinaciones complejas de cargas mixtas que incluyen NLL. Los cálculos descritos se han mantenido deliberadamente simples. Sus raíces son el resultado de años de experiencia en la realización de cálculos complejos que llevan a la observación de que, para la gran mayoría de los NLL típicos, se podría utilizar un cálculo de "vía rápida" y esta experiencia ahora se comparte.

RECOMENDACIONES

La distorsión armónica se suma a la temperatura de funcionamiento del alternador y, por lo tanto, la carga continua total nunca debe exceder una clasificación de aumento de temperatura Clase 'F' [105/40].

Una vez que la información esté disponible para los puntos claves anteriormente mencionados para las cargas no lineales, el departamento de ingeniería de aplicaciones podrá nominar rápidamente un alternador adecuado para cualquier tipo de carga no lineal. Correo electrónico, applications@cummins.com.

Es importante aceptar que son las cargas no lineales (NLL) el primer elemento en fallar en condiciones de niveles inaceptablemente altos de distorsión armónica de voltaje, no el alternador.

Consulte el AGN026 Distorsión Armónica de Voltaje para obtener más información sobre los niveles aceptables de $V_{dist}\%$, los efectos de calentamiento en un alternador y formas de reducir la distorsión.