

Motores de inducción alimentados por convertidores de frecuencia PWM

■ Guía Técnica



Índice

1	Introducción.....	4
2	Aspectos Normativos.....	5
2.1	NEMA MG1 - Motors and generators / “Estados Unidos”.....	5
2.2	NEMA - Application Guide for AC Adjustable Speed Drive Systems.....	5
2.3	IEC 60034 - Rotating Electrical Machines / “Internacional”.....	5
2.4	Otros documentos técnicos de referencia.....	5
3	Variación de velocidad de motores de inducción.....	5
4	Características de los convertidores de frecuencia PWM.....	7
4.1	General.....	7
4.2	Modos de control.....	8
5	Interacción entre red y convertidor.....	8
5.1	Harmónicas.....	8
5.1.1	Consideraciones normativas sobre las harmónicas.....	9
5.2	Reactancia de red / Inductor en el link DC.....	9
6	Interacción entre convertidor y motor.....	10
6.1	Harmónicas que afectan el desempeño del motor.....	10
6.1.1	Consideraciones normativas sobre las harmónicas en la salida del convertidor.....	10
6.2	Consideraciones en relación a la eficiencia.....	11
6.2.1	La Influencia de la variación de velocidad en la eficiencia del motor.....	12
6.2.2	Consideraciones normativas sobre la eficiencia de motores alimentados por convertidores de frecuencia.....	12
6.3	Influencia del convertidor en la elevación de temperatura del motor.....	13
6.4	Criterios, cuanto a la elevación de temperatura, para motores WEG alimentados por convertidores de frecuencia.....	13
6.4.1	Reducción del par (Derating Torque).....	13
6.4.2	Par de Arranque.....	14
6.4.3	Par Máximo.....	15
6.5	Influencia del convertidor en el sistema aislante del motor.....	15
6.5.1	Rise Time.....	15
6.5.2	Largo del cable.....	16
6.5.3	Mínimo tiempo entre pulsos consecutivos.....	17
6.5.4	Frecuencia de conmutación.....	18
6.5.5	Aplicaciones con múltiples motores.....	18
6.6	Criterios de aislamiento para motores WEG alimentados por convertidores de frecuencia.....	18
6.7	Consideraciones normativas sobre el aislamiento de motores accionados por convertidores de frecuencia.....	18
6.8	Recomendaciones para los cables de conexión entre motor y convertidor WEG.....	19
6.8.1	Tipos de cables y orientaciones de instalación.....	20
6.9	Influencia del convertidor en la corriente que circula por los cojinetes del motor (tensión inducida en el eje).....	20
6.9.1	Tensiones modo común.....	21
6.9.2	Circuito equivalente del motor para las corrientes capacitivas de alta frecuencia.....	21
6.9.3	Métodos para evitar o minimizar la circulación de corriente eléctrica por los cojinetes del motor alimentado por convertidor.....	22
6.10	Criterios, cuanto a la corriente por los cojinetes (tensión en el eje), para motores de inducción WEG alimentados por convertidores.....	23
6.11	Consideraciones normativas sobre las corrientes que circulan por los cojinetes de los motores accionados por convertidores.....	23

6.12	Influencia del convertidor en el ruido acústico emitido por el motor.....	23
6.13	Criterios de ruido para motores WEG accionados por convertidores.....	24
6.14	Consideraciones normativas sobre el ruido de motores accionados por convertidores.....	24
6.15	Influencia del convertidor en la vibración mecánica del motor.....	24
6.16	Criterios de vibración para motores WEG accionados por convertidores.....	24
6.17	Consideraciones normativas sobre vibración, para motores accionados por convertidores.....	24
7	Interacción entre motor y carga accionada.....	25
7.1	Tipos de carga.....	25
7.1.1	Cargas de par variable.....	25
7.1.2	Cargas de par constante.....	25
7.1.3	Cargas de potencia constante.....	26
7.2	Regímenes de operación.....	26
7.2.1	Régimen de velocidad variable.....	26
7.2.2	Régimen de velocidad constante.....	26
8	Dimensionamiento y análisis de accionamientos eléctricos con velocidad variable – Ejemplos prácticos.....	26
8.1	Aplicación con compresor (par constante).....	26
8.1.1	Ejemplo.....	26
8.1.2	Resolución.....	26
8.2	Aplicación con bomba centrífuga - par cuadrático.....	27
8.2.1	Ejemplo.....	27
8.2.2	Resolución.....	27
8.3	Aplicación especial – cable largo.....	29
8.3.1	Ejemplo.....	29
8.3.2	Resolución.....	29
8.4	Aplicación para la industria textil (par variable / velocidad variable).....	30
8.4.1	Ejemplo.....	30
8.4.2	Resolución.....	31
8.5	Ejemplo considerando la utilización de la Solución Flujo Óptimo WEG.....	32
8.5.1	Ejemplo.....	32
8.5.2	Resolución.....	32
9	Recomendaciones para la realización de mediciones de formas de ola del tipo PWM.....	32
9.1	Alerta.....	32
9.2	Instrumentación.....	32
9.3	Medición de parámetros.....	33
9.4	Consideraciones en relación al aterramiento.....	33
9.4.1	Aterramiento del convertidor.....	33
9.4.2	Aterramiento del motor.....	33
9.5	Procedimientos de medición.....	33
9.5.1	Visualización de la forma de ola.....	33
9.5.2	Ajuste del fondo de escala del osciloscopio.....	33
9.5.3	Trigger.....	34
10	Conclusión.....	34
11	Bibliografía.....	35

1 Introducción



El accionamiento de motores eléctricos de inducción por convertidores estáticos de frecuencia (comercialmente denominados también simplemente variadores de frecuencia) es una solución relativamente nueva, pero, ya ampliamente utilizada en la industria. Así siendo, todavía hay mucho por ser hecho/estudiado/comprendido en tales aplicaciones y se puede ver que, con la evolución en la área, la necesidad de provisión de orientación técnica específica concerniente al tema por parte de los fabricantes de motores y convertidores, para que tales aplicaciones sean efectivamente ventajosas en términos de eficiencia energética y atractivas en términos de costo.

Esta guía técnica fue elaborada visando la aclaración de los principales aspectos relacionados con las aplicaciones de motores de inducción de baja tensión (hasta 690 V y hasta carcasas IEC 355 / NEMA 587) con convertidores electrónicos de frecuencia, de manera didáctica y concisa.

Inicialmente son citadas las principales normas internacionales que abordan el tema (no hay todavía una norma brasileira que oriente el uso de convertidores electrónicos para el accionamiento de máquinas CA).

En la continuación son presentados los fundamentos teóricos de la variación de velocidad de motores de inducción a través de los convertidores estáticos indirectos y las características esenciales de estos convertidores.

Una vez conocidas las bases de los accionamientos electrónicos de velocidad variable, se analiza el comportamiento del sistema de potencia como un todo, por medio de la comprensión de las interacciones entre las diversas partes que lo integra (red – convertidor – motor – carga), decurrentes de la variación electrónica de la velocidad del motor de inducción.

Finalmente, se presentan ejemplos de dimensionamientos, para una mejor comprensión de las cuestiones expuestas.

A lo largo del documento, buscando siempre la elucidación técnica más completa, son enfatizadas y discutidas cuestiones polémicas, con la exposición de divergencias existentes entre los diferentes organismos internacionales de normalización, bien como la posición de WEG respecto a tales situaciones.



2 Aspectos normativos

2.1 NEMA MG1 - Motors and generators / “Estados Unidos”

- **Parte 30** - Application considerations for constant speed motors used on a sinusoidal bus with harmonic content and general purpose motors used with adjustable-frequency controls or both (2006)
- **Parte 31** - Definite-purpose inverter-fed polyphase motor (2006)

2.2 NEMA - Application Guide for AC Adjustable Speed Drive Systems (2001)

2.3 IEC 60034 - Rotating Electrical Machines / “Internacional”

- **Parte 17** - Cage induction motors when fed from converters – application guide (2006)
- **Parte 25** - Guide for the design and performance of cage induction motors specifically designed for converter supply (2007)

2.4 Otros documentos técnicos de referencia

- GAMBICA/REMA Technical Guides for Variable Speed Drives and Motors
- GAMBICA/REMA Technical Reports for Variable Speed Drives and Motors
- CSA C22.2 No.100-2004 Item 12 (Canadá) “Motors and Generators – Industrial Products”
- JEM-TR 148-1986 (Japón)
“Application guide for inverter drive (general-purpose inverter)”
- IEC 60034-18-41 – Qualification and design tests for Type I electrical insulation systems used in rotating electrical machines fed from voltage converters
- Artículos técnicos y libros relacionados al tema

3 Variación de velocidad de motores de inducción

La relación entre la rotación, la frecuencia de alimentación, el número de polos y el deslizamiento de un motor de inducción obedece a la siguiente ecuación:

$$n = \frac{120 f_1}{p} (1-s)$$

donde:

n : velocidad de rotación mecánica (rpm)

f_1 : frecuencia fundamental de la tensión de alimentación (Hz)

p : número de polos

s : deslizamiento

El análisis de la fórmula demuestra que se puede actuar en tres parámetros, con el intento de variar la velocidad de un motor de este tipo, según se verifica en la tabla abajo. La tabla presenta también las características de cada opción.

Variación de velocidad	
Parámetro de variación velocidad	Característica de aplicación
Número de polos	Variación discreta
	Sobredimensionamiento de la carcasa
Deslizamiento	Variación continua
	Pérdidas del rotor
	Rango de variación pequeña
Frecuencia de la tensión del estator	Variación continua
	¡Uso de CONVERTIDORES DE FRECUENCIA!

La utilización de convertidores estáticos de frecuencia actualmente comprende el método más eficiente para controlar la velocidad de los motores de inducción. Los convertidores transforman la tensión de la red, de amplitud y frecuencia constantes, en una tensión de amplitud y frecuencia variables. Con la variación de la frecuencia de la tensión de alimentación, se varía también la velocidad del campo girante y consecuentemente la velocidad mecánica de rotación de la máquina.

El par desarrollado por el motor de inducción sigue la ecuación:

$$T = k_1 \cdot \phi_m \cdot I_2$$

Y su flujo de magnetización, despresándose la caída de tensión ocasionada por la resistencia y por la reactancia de los devanados estatóricos, vale:

$$\phi_m = k_2 \cdot \frac{V_1}{f_1}$$

donde:

T : par o conjugado disponible en la punta de eje (N.m)

ϕ_m : flujo de magnetização (Wb)

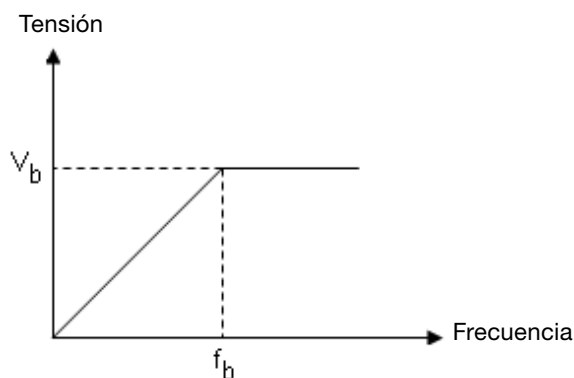
I_2 : corriente rotórica (A) → depende de la carga!

V_1 : tensión estatórica (V)

k_1 e k_2 : constantes → dependen del material y del diseño de la máquina!

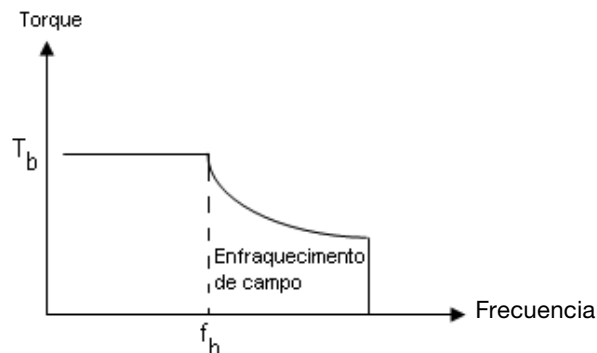
Admitiéndose, que la corriente depende de la carga y que esta es constante (por tanto, corriente prácticamente constante), se nota, que variando proporcionalmente la amplitud y la frecuencia de la tensión de alimentación, el flujo y, consecuentemente, el par permanecen constantes. El motor entonces provee un ajuste continuo de velocidad y par con relación a la carga mecánica. Las pérdidas pueden ser minimizadas de acuerdo con las condiciones de carga, manteniéndose constante el deslizamiento de la máquina en cualquier velocidad, para la misma carga.

A partir de las ecuaciones arriba, se obtiene los gráficos abajo.

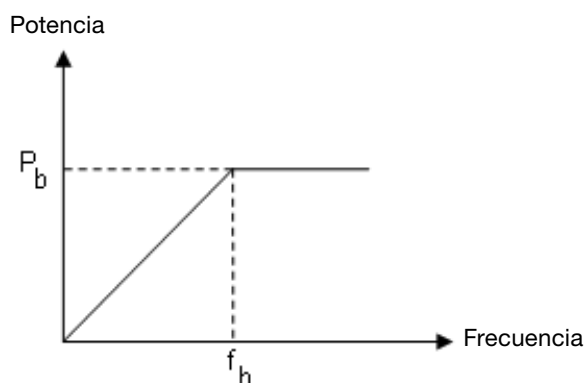


La variación de la relación V_1/f_1 es hecha linealmente hasta la frecuencia base (nominal) del motor. Arriba de esta, la tensión es máxima (igual a la nominal) y permanece constante, habiendo entonces solamente la variación de la frecuencia aplicada al devanado estatórico del motor, según representado en la figura anterior.

Así, arriba de la frecuencia base caracterizase la llamada región de enflaquecimiento de campo, pues allí el flujo decrece con el aumento de la frecuencia, causando también la disminución de par. La curva característica par x velocidad del motor accionado por convertidor de frecuencia está representada abajo.



Se nota, por tanto, que el par permanece constante hasta la frecuencia base y decrece gradualmente arriba de esta. Como Potencia = Par X Rotación, la potencia útil del motor crece linealmente hasta la frecuencia base y permanece constante arriba de esta, según se puede observar abajo.



No por acaso ha crecido significativamente el número de aplicaciones en que la variación de velocidad de motores de inducción es realizada por medio de convertidores electrónicos estáticos de frecuencia, teniendo en cuenta los muchos beneficios propiciados por estas aplicaciones:

- Control a distancia – en los sistemas electrónicos de variación de velocidad, el equipamiento de control puede estar ubicado en un área conveniente, quedando solamente el motor accionado en el área de procesamiento – al revés de los sistemas hidráulicos y mecánicos de variación de velocidad.
- Reducción de costos – arranques directos ocasionan picos de corriente, que causan daños no solamente al motor, pero también a otros equipamientos conectados al sistema eléctrico. Convertidores estáticos proporcionan arranques más suaves, reduciendo costos con mantenimiento.
- Aumento de productividad – sistemas de procesamiento industrial generalmente son sobredimensionados en la perspectiva de un aumento futuro de productividad.

Convertidores estáticos posibilitan el ajuste de la velocidad operacional más adecuada al proceso, de acuerdo con los equipamientos disponibles y la necesidad de producción en cada momento.

- **Eficiencia energética** – la eficiencia global del sistema de potencia depende no solamente del motor, pero también del control. Los convertidores estáticos de frecuencia presentan eficiencia elevada, de orden de 97% o más. Motores eléctricos también presentan alta eficiencia, llegando a 95% o más en máquinas más grandes operando bajo condiciones nominales. En la variación electrónica de velocidad la potencia suministrada por el motor varía de manera optimizada, influenciando directamente la potencia consumida y conduciendo a elevados índices de eficiencia del sistema (motor + convertidor).
- **Versatilidad** – convertidores estáticos de frecuencia son adecuados para aplicaciones con cualquier tipo de carga. Con cargas de par variable (pequeña demanda de par en bajas rotaciones), el control reduce la tensión del motor compensando la caída de eficiencia que normalmente resultaría de la disminución de carga. Con cargas de par (o potencia) constante la mejoría de eficiencia del sistema proviene de la capacidad de variar continuamente la velocidad, sin la necesidad de utilizar múltiples motores o sistemas mecánicos de variación de velocidad (como poleas y engranajes), que introducen pérdidas adicionales.
- **Mayor calidad** – el control preciso de velocidad obtenido con convertidores resulta en la optimización de los procesos. El control optimizado del proceso proporciona un producto final de mejor calidad.

4 Características de los convertidores de frecuencia PWM

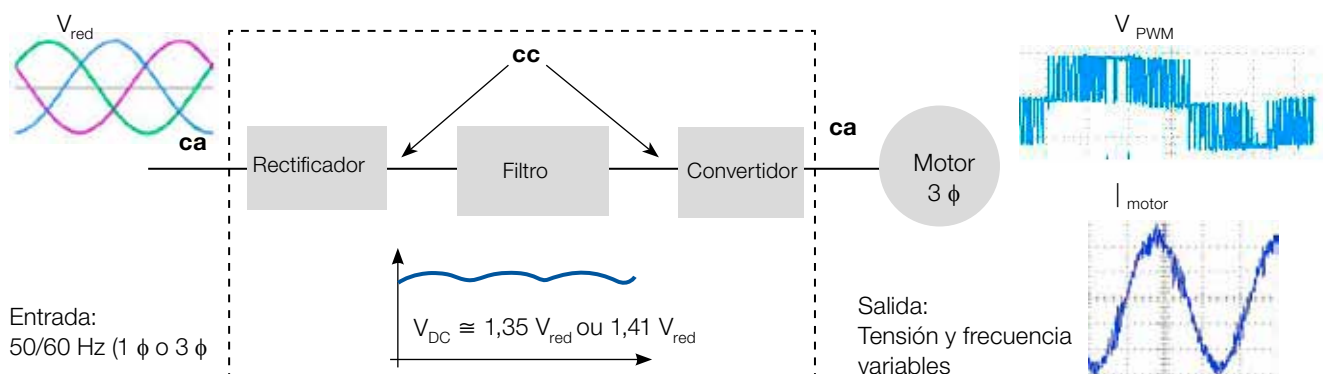
4.1 General

Convertidores estáticos indirectos de frecuencia con tensión impuesta PWM son actualmente los equipamientos más empleados para la alimentación de motores de baja tensión en las aplicaciones industriales que requieren variación de velocidad. Ellos operan como una interfaz entre la fuente de energía (red) y el motor de inducción. El proceso de obtención de la tensión y frecuencia deseados por medio de tales equipamientos pasa por tres etapas:

- **Puente de diodos** – Rectificación de la señal alternada – de tensión y frecuencia constantes – proveniente de la red de alimentación

- **Filtro o Link DC** – Suavización/regulación de la tensión rectificada con el almacenamiento de energía por medio de un banco de capacitores
- **Transistores IGBT** – Inversión de la tensión continua proveniente del link DC en una señal alternada, con tensión y frecuencia variables

El diagrama abajo ilustra las etapas descritas arriba.



Observaciones:

- Cuando el motor está en vacío o con cargas ligeras, la tensión en el link DC tiende a estabilizar en el valor igual a $\sqrt{2} V_{red} \cong 1,41 V_{red}$. Pero, cuando el motor está con cargas más elevadas (por ejemplo, plena carga), la tensión en el link DC tiende al valor $(3/\pi) \sqrt{2} V_{red} \cong 1,35 V_{red}$.
- Los criterios definidos para los sistemas de aislamiento de los motores WEG alimentados por convertidores, presentados adelante, consideran el valor $\sqrt{2}$ por ser lo más elevado y, por tanto, lo más crítico para el motor. Así, los criterios WEG atienden a ambas situaciones.

4.2 Modos de control

Basicamente existen dois tipos de controle dos inversores eletrônicos: o escalar e o vetorial.

Básicamente hay dos tipos de control de los convertidores electrónicos: el escalar y el vectorial.

El **control escalar** está basado en el concepto original del convertidor de frecuencia: impone en el motor una determinada tensión/frecuencia, visando mantener la relación V/f constante, o sea, el motor trabaja con flujo aproximadamente constante. Es aplicado cuando no hay la necesidad de respuestas rápidas a comandos de par y velocidad y es particularmente interesante cuando hay conexión de múltiplos motores a un único convertidor. El control es realizado en malla abierta y la precisión de la velocidad es función del deslizamiento del motor, que varía en función de la carga, ya que la frecuencia en el estator es impuesta. Para mejorar el desempeño del motor en las bajas velocidades, algunos convertidores poseen funciones especiales como la compensación de deslizamiento (que atenúa la variación de la velocidad en función de la carga) y el boost de tensión (aumento de la relación V/f para compensar el efecto de la caída de tensión en la resistencia estática), de manera que la capacidad de par del motor sea mantenida. El control escalar es lo más utilizado debido a su simplicidad y debido al facto de que la gran mayoría de las aplicaciones no requiere alta precisión y/o rapidez en el control de la velocidad.

El **control vectorial** posibilita atingir un elevado grado de precisión y rapidez en el control del par y de la velocidad del motor. El control decompone la corriente del motor en dos vectores: uno que produce el flujo de magnetización y otro que produce par, regulando separadamente el par y el flujo. El control vectorial puede ser realizado en malla abierta ("sensorless") o en malla cerrada (con realimentación)

- Con sensor de velocidad – requiere la instalación de un sensor de velocidad (por ejemplo, un encoder incremental) en el motor. Este tipo de control permite la mayor precisión posible en el control de la velocidad y del par, inclusive en rotación nula.
- Sensorless – más simples que el control con sensor, pero, presenta limitaciones de par principalmente en bajísimas rotaciones. En velocidades más elevadas es prácticamente tan bueno cuanto el control vectorial con realimentación.

Las principales diferencias entre los dos tipos de control son que el control escalar sólo considera las amplitudes de las grandezas eléctricas instantáneas (flujos, corrientes y tensiones), refiriéndolas al estator, y su cálculo está basado en el circuito equivalente del motor, o sea, son ecuaciones de régimen permanente. Ya el control vectorial admite la representación de las grandezas eléctricas instantáneas por vectores, estando basado en las ecuaciones espaciales dinámicas de la máquina, con las grandezas referidas al flujo enlazado por el rotor, o sea, el motor de inducción es visto por el control vectorial como un motor de corriente continua, habiendo regulación independiente para par y flujo.

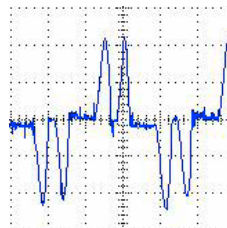
5 Interacción entre red y convertidor

5.1 Harmónicas

El sistema (motor + convertidor de frecuencia) es visto por la fuente de alimentación como una carga no lineal, cuya corriente posee harmónicas (componentes de frecuencias múltiples de frecuencia de la red). De manera general, considerase que el rectificador produce harmónicas características de orden $h =$

$np \pm 1$ en el lado CA, o sea, en la red (p es el número de pulsos del convertidor y $n = 1, 2, 3$). Así, en caso del puente rectificador con 6 diodos (6 pulsos), las principales harmónicas generadas son la 5ª y la 7ª, cuyas amplitudes pueden variar de 10% a 40% de la fundamental dependiendo de la impedancia de red.

Ya para 12 pulsos (12 diodos) las harmónicas más expresivas son la 11ª y la 13ª. Las harmónicas superiores generalmente poseen menor amplitud y son más fáciles de filtrar. Los convertidores WEG de baja tensión normales (Estándar), así como la mayoría de los convertidores de otros fabricantes, son de 6 pulsos.



El parámetro que demuestra lo cuanto las harmónicas pueden causar distorsión en la red es el THD (Distorsión Harmónica Total), suministrado por el fabricante del convertidor y definido como:

$$THD = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \left(\frac{A_h}{A_1} \right)^2}$$

donde:

A_h son los valores eficaces de las componentes harmónicas
 A_1 es el valor eficaz de la componente fundamental

La forma de ola arriba es la corriente medida en la entrada de un convertidor PWM de 6 pulsos, para una red de baja impedancia.

5.1.1 Consideraciones normativas sobre las armónicas

El NEMA Application Guide for AC ASD Systems hace referencia a la norma IEEE Std.519 (1992), que recomienda límites de THD para sistemas con tensión ≤ 69 kV según presentado en las tablas que siguen. Esta norma define valores para la instalación final, siendo necesario el análisis de cada caso. Datos como impedancia de cortocircuito de la red, puntos de conexión común (PCC) del convertidor y otras cargas, adentre otros, influyen en los valores recomendados.

Armónicas de tensión	
Todas pares	3,0%
Todas impares	3,0%
THD _{tensión}	5,0%

La máxima distorsión en corriente recomendada por la IEEE-519 es dada en términos del TDD (Distorsión Total de Demanda) y depende de la relación (I_{SC} / I_L), donde I_{SC} es la máxima corriente de cortocircuito en el PCC y I_L es la máxima corriente de demanda de la instalación (componente de frecuencia fundamental) en el PCC.

Armónicas de corriente impares (Las corrientes armónicas pares están limitadas en 25% de las impares)						
Máxima distorsión armónica de corriente (porcentualmente en relación a I_L)						
I_{SC} / I_L	< 11	$11 \leq h \leq 17$	$17 \leq h \leq 23$	$23 \leq h \leq 35$	$35 \leq h$	TDD
$< 20^*$	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
$20 < 50$	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
$50 < 100$	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
$100 < 1000$	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
> 1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

* Todo equipamiento de generación de potencia está limitado a estos valores de distorsión de corriente, independientemente del valor real de la relación I_{SC} / I_L .

Los documentos IEC citados, por otro lado, no abordan este aspecto.

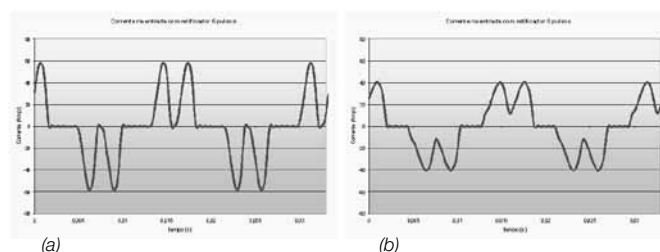
5.2 Reactancia de red / inductor en el link DC

Las corrientes armónicas, que circulan por las impedancias de la red de alimentación y dependen de los valores de las impedancias presentes en el circuito de entrada/salida del rectificador, causan caídas de tensión armónicas, distorciendo la tensión de alimentación del propio convertidor o de otros equipamientos conectados a la red. Estas distorsiones armónicas de corriente y tensión pueden ocasionar un bajo factor de potencia, además de aumentar las pérdidas eléctricas en las instalaciones con sobrecalentamiento de componentes tales como cables, transformadores, motores, bancos de capacitores, etc.

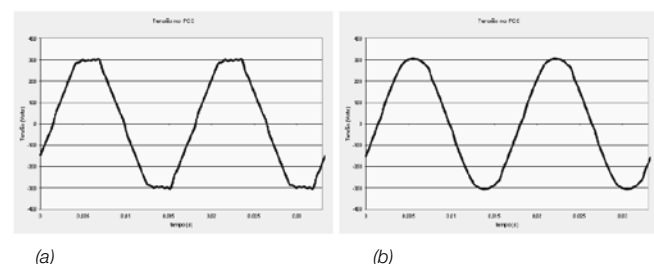
Para reducir el contenido armónico de la corriente y aumentar el factor de potencia puede ser instalada una inductancia en la entrada y/o en el link DC del convertidor. El inductor en el link DC tiene el ventaja de no introducir caída de tensión, pero, dependiendo de la combinación de

su valor con los valores de impedancia de la red y capacitancia del link DC, puede resultar en resonancias indeseadas con el sistema. La reactancia de red, por otro lado, disminuye la tensión mediana del circuito intermedio (comparada aquella obtenida sin reactancia), pero es más eficaz en la reducción de eventuales transientes de sobretensión de la red, además de reducir la corriente eficaz en los diodos del rectificador y el ripple de corriente en los capacitores del circuito intermedio, aumentando la vida útil de los semiconductores y del banco de capacitores constituyentes del link DC.

Corriente en la entrada del convertidor



Tensión en la entrada del convertidor

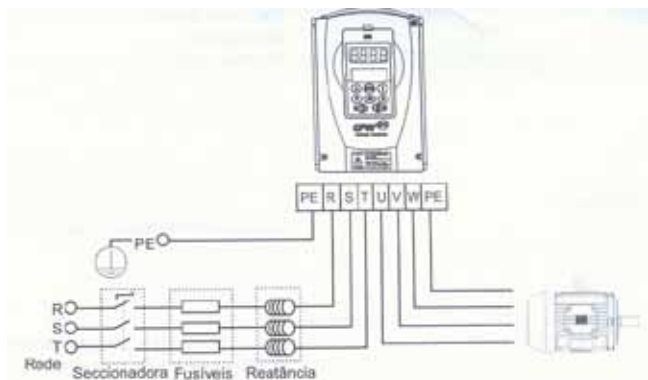


Formas de ola de tensión y corriente en la entrada del convertidor sin (a) y con (b) reactancia de red. Se puede verificar que, la reactancia de red suaviza los picos (reduce, por tanto, el contenido armónico) y disminuye el valor eficaz da corriente en la entrada, causando también disminución de la distorsión de la tensión en la entrada del convertidor. Para evitar daños al convertidor débese tener una impedancia mínima de red que proporcione una caída de tensión porcentual de 1 a 2%, dependiendo del tamaño del convertidor de frecuencia, para la corriente nominal del convertidor. Como criterio de uso considerase que una reactancia de red que presenta una caída de tensión porcentual de 2 a 4% (para la corriente nominal del convertidor de frecuencia) resulta en un buen compromiso entre la caída de tensión en el motor, la mejoría del factor de potencia y la reducción de la distorsión armónica de la corriente.

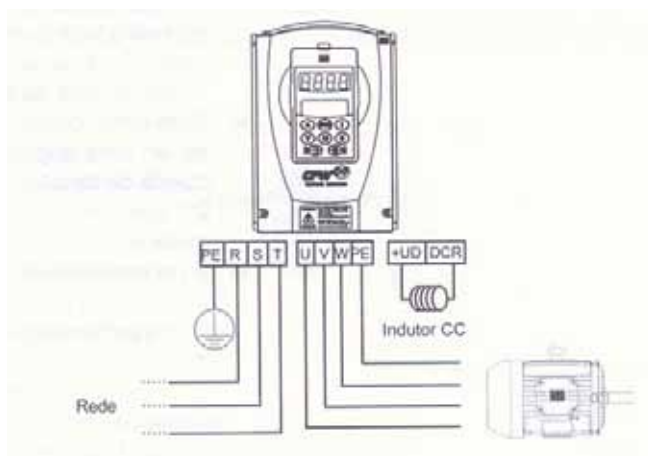
El valor da reactancia de red necesaria para que se obtenga la caída de tensión porcentual deseada puede ser calculado de la siguiente manera:

$$L = \frac{(\text{caída tensión})\% \cdot V_{rede}}{\sqrt{3} \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_{red} \cdot I_{nominal}} \quad [H]$$

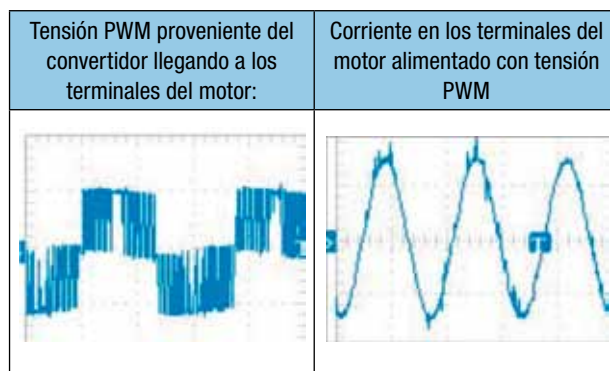
A seguido están ilustradas las conexiones de potencia (a) con reactancia de red y (b) con inductor en el link DC.



(a) Conexiones de potencia con reactancia de red en la entrada



(b) Conexiones de potencia con inductor en el link DC



Se verifica que el motor “ve” una tensión pulsada (PWM) y una corriente prácticamente senoidal, por tanto, las armónicas de mayor amplitud en el motor son de tensión. Básicamente, para reducir las armónicas generadas por un convertidor de frecuencia PWM, hay las siguientes soluciones:

Método de reducción de las armónicas	Características de la solución
Instalación de filtros pasivos de salida (L, LC (senoidal), dV/dt)	Aumento del costo de la instalación
	Restricción para operaciones en los modos vectoriales
	Caída de tensión (reducción de la potencia del motor)
Utilização de inversor com mais níveis	Aumento de costos
	Reducción de confiabilidad del convertidor
	Aumento de la complejidad del control
Melhoria na qualidade da modulação PWM (aprimoramento do padrão de pulsos)	Space Vector Modulation (SVM)*
	No aumenta costos
	Mejoría en el control de tensión
Aumento da frequência de chaveamento	Mayor eficiencia del conjunto (motor + convertidor)
	Reducción de la eficiencia del convertidor (aumento de las pérdidas por conmutación)
	Aumento de las corrientes de fuga para la tierra

* Todos los convertidores de frecuencia fabricados por WEG emplean la modulación SVM.

6 Interacción entre convertidor y motor

6.1 Armónicas que afectan el desempeño del motor

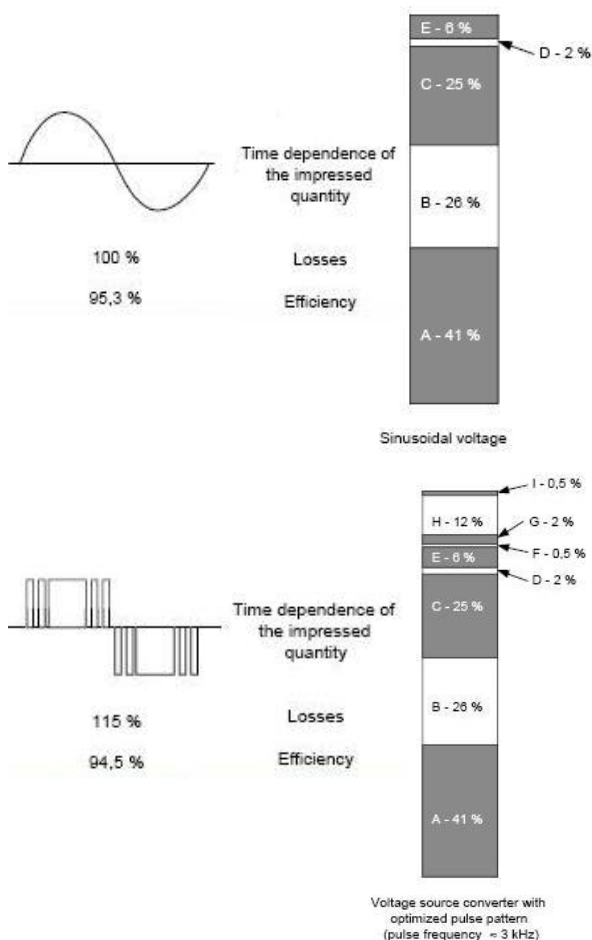
El motor de inducción sometido a una tensión PWM, proveniente de un convertidor de frecuencia, estará sujeto a tensiones armónicas (componentes de frecuencia arriba de la frecuencia fundamental). Dependiendo de la modulación PWM empleada, de la frecuencia de conmutación y de otras particularidades del control, el motor podrá presentar incremento de pérdidas y temperatura, incremento de los niveles de vibración y ruido y pérdidas de eficiencia.

Además de eso, pueden aparecer otros efectos cuando de la alimentación del motor por convertidores, como “stress” del sistema de aislamiento y corrientes por los cojinetes, que, aunque relevantes, no se deben específicamente a las armónicas, pero a otros factores que serán abordados a seguido. Las figuras abajo ilustran las formas de ola de tensión y corriente en los terminales del motor, cuando bajo alimentación PWM.

6.1.1 Consideraciones normativas sobre las armónicas en la salida del convertidor

No hay normalización cuanto a los valores límites de distorsión armónica de tensión y corriente. Pero, las normas consideran el aumento de las pérdidas del motor debido al uso de convertidor.

La IEC 60034-17 ejemplifica el aumento de las pérdidas del motor debido al uso de convertidor con un caso práctico de un motor de carcasa 315, con valores nominales de par y velocidad:



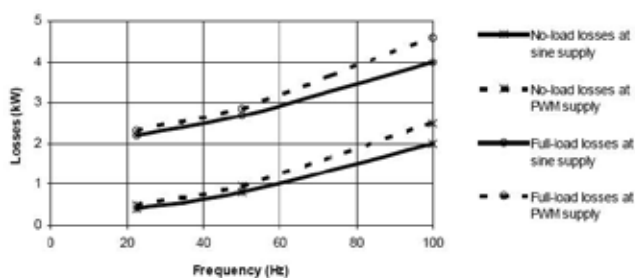
Pérdidas causadas por la frecuencia fundamental

- A - pérdidas Joule en el estator
- B - pérdidas Joule en el rotor
- C - pérdidas en el hierro
- D - pérdidas suplementares
- E - pérdidas por atrito

Pérdidas causadas por las armónicas

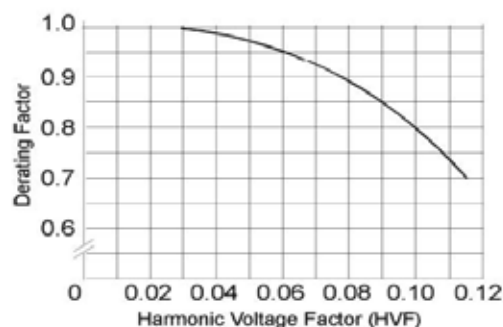
- F - pérdidas Joule en el estator
- G - pérdidas Joule en el rotor
- H - pérdidas en el hierro
- I - pérdidas suplementares
- J - pérdidas de conmutación

La IEC 60034-25 ilustra el aumento de las pérdidas del motor debido a la alimentación PWM con la figura abajo:



La NEMA MG1 – Parte 30 considera una reducción porcentual de par para evitar el sobrecalentamiento excesivo de un motor normal alimentado por convertidor, que estará

sujeto a corrientes armónicas decurrentes del contenido armónico de la tensión PWM:



$$HVF = \sqrt{\sum_{n=5}^{\infty} \left(\frac{V_n}{n} \right)^2}$$

donde:

n: orden de la armónica impar, no incluyendo las divisibles por 3

V_n : amplitud de la n-ésima armónica de tensión (por unidad)

6.2 Consideraciones en relación a la eficiencia

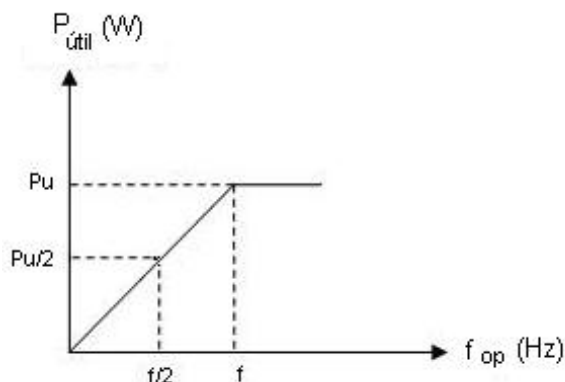
La falta de una norma que especifique el procedimiento de pruebas para evaluación de la eficiencia del sistema (convertidor + motor) permite que la prueba sea realizada de diferentes maneras. Por tanto, los resultados obtenidos no deben influenciar en la aceptación o no del motor, excepto mediante acuerdo entre fabricante y comprador.

La experiencia adquirida hasta el momento, todavía, permite que se tome las siguientes consideraciones:

- El motor de inducción, cuando alimentado por un convertidor de frecuencia PWM, tiene su eficiencia disminuida, en relación a un motor alimentado por tensión puramente senoidal, debido al aumento en las pérdidas ocasionado por las armónicas;
- En aplicaciones de motores de inducción de jaula con convertidores de frecuencia, pero, debe ser evaluada la eficiencia del sistema (conjunto convertidor + motor) y no solamente del motor;
- Cada caso debe ser analizado. Se debe considerar las características del convertidor y del motor, tales como: frecuencia de operación, frecuencia de conmutación, condición de carga y potencia del motor, tasa de distorsión armónica del convertidor;
- La instrumentación utilizada en las mediciones es de extrema importancia. Deben ser utilizados instrumentos que puedan medir el valor eficaz verdadero (true RMS) de las grandezas eléctricas, de modo que sea posible la lectura de los valores correctos de potencia absorbida en la entrada y en la salida del convertidor;
- El aumento de la frecuencia de conmutación disminuye la eficiencia del convertidor y aumenta la eficiencia del motor.
- Motores de alta eficiencia alimentados por convertidores de frecuencia mantienen su eficiencia superior, en comparación con motores estándar alimentados por convertidores.

6.2.1 La Influencia de la variación de velocidad en la eficiencia del motor

El efecto de la variación de velocidad sobre la eficiencia del motor puede ser entendido a partir del análisis del gráfico de la potencia útil del motor alimentado por convertidor en función de su frecuencia de operación, ya presentado.



Si la frecuencia base es 60 Hz, por ejemplo, se tiene para las situaciones arriba:

$$P_{60\text{ Hz}} = P_u$$

$$P_{30\text{ Hz}} = \frac{P_u}{\frac{60}{30}} = 0,5 P_u$$

Considerando que las pérdidas del motor sean compuestas fundamentalmente por pérdidas Joule (P_j) y pérdidas en el hierro (P_{fe}) y asumiendo que las pérdidas Joule comprendan la mayor componente de pérdidas, entonces la eficiencia del motor debe caer en las bajas frecuencias, en las cuales la potencia útil del motor es disminuida y, aunque las pérdidas en el hierro (dependen de la frecuencia) disminuyan un poco, las pérdidas Joule (dependen de la corriente al cuadrado) prácticamente se mantienen para una carga de par constante, de manera a no ocurrir significativa variación global de las pérdidas.

Las ecuaciones a seguir aclaran eso. Definiéndose eficiencia como:

$$\eta \% = \frac{P_u}{P_{abs}} = \frac{P_u}{P_u + \sum \text{Pérdidas}}$$

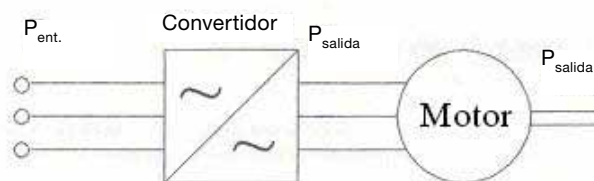
y, por las consideraciones arriba,

$$\sum \text{Pérdidas} \cong P_{fe} + P_i \quad (P_i > P_{fe})$$

la siguiente situación viene de la reducción de velocidad:

$$\left. \begin{array}{l} \downarrow P_{fe} + P_i \cong cte \quad (PJ \gg P_{fe}) \\ \Rightarrow \sum \text{Pérdidas} \cong cte \\ \downarrow P_u \end{array} \right\} \downarrow \eta \% \downarrow$$

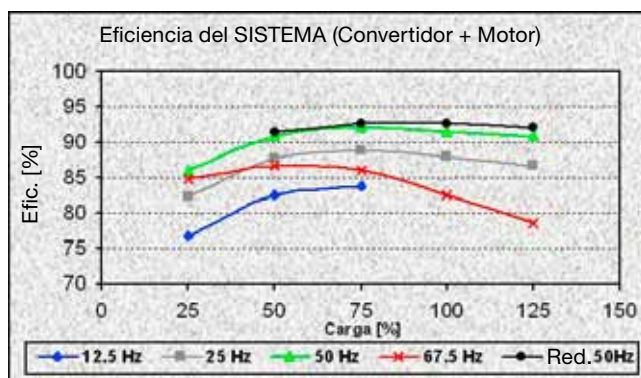
6.2.1.1 Ejemplo numérico



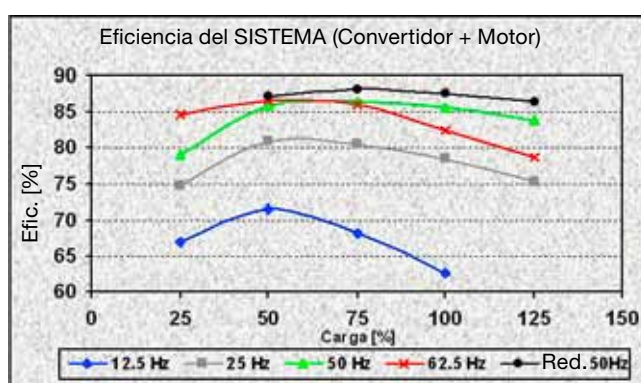
$$\left. \begin{array}{l} \eta_{conv} = P_{salida} / P_{ent} \\ \eta_{conv} = P_{útil} / P_{salida} \end{array} \right\} \eta_{sist} = P_{útil} / P_{abs} = P_{útil} / P_{ent} = \eta_{conv} \cdot \eta_{mot}$$

Algunos ejemplos de valores experimentales obtenidos por el método directo (medición de potencia en la entrada y en la salida) con motores estándar:

Motor 75 cv (55 kW) – 6 polos – 400 V – 50 Hz



Motor 15 cv (11 kW) – 4 polos – 400 V – 50 Hz



6.2.2 Consideraciones normativas sobre la eficiencia de motores alimentados por convertidores de frecuencia

- NEMA MG1 Part 30 – La eficiencia del motor caerá, cuando operado en un control. Los armónicos presentes elevarán las pérdidas eléctricas, que reducirán la eficiencia y causarán aumento también de la temperatura del motor, reduciendo aún más la eficiencia del motor.

- NEMA MG1 Part 31 – Pruebas de desempeño, cuando solicitadas, deberán ser realizadas con tensión senoidal. Pero, el motor alimentado por convertidor de frecuencia podrá ser probado, desde que haya un acuerdo mutuo entre el fabricante y el usuario.
- NEMA Application Guide for AC ASD Systems – La eficiencia global del sistema está basado en las pérdidas totales del motor, del control y de cualquier equipamiento auxiliar. El uso de convertidores frecuentemente aumenta la eficiencia del sistema, se comparado con los métodos tradicionales de variación de velocidad (como engranajes y correas) y de ajuste de carga (como válvulas y amortiguadores).
- IEC 60034-17 – Las características de desempeño de las aplicaciones con motores de inducción alimentados por convertidores de frecuencia son influenciadas por todo el sistema, comprendiendo la fuente de alimentación, el convertidor, el motor, la carga mecánica y el equipamiento de control. Debido a la complejidad de las interacciones técnicas entre el sistema y las diversas condiciones de operación, está afuera del escopo de la especificación técnica la cuantificación de valores numéricos relacionados con tales aplicaciones. No hay método sencillo para calcular las pérdidas adicionales y no se puede hacer cualquier afirmación genérica respecto a su valor.
- IEC 60034-25 – Los métodos recomendados para la determinación de la eficiencia del motor están dados en la IEC 60034-2 (método de separación de pérdidas para motores > 150 kW y medición de entrada-salida para motores ≤ 150 kW). Las pérdidas en vacío (incluyendo las pérdidas suplementares) deben ser medidas si posible con el mismo método de modulación y frecuencia de conmutación que el convertidor producirá con plena carga. La determinación de la eficiencia global del sistema (motor + convertidor) por medición entrada-salida es también aplicable, bajo acuerdo entre fabricante y usuario. En este caso, la eficiencia del motor no podrá ser determinado separadamente.

6.3 Influencia del convertidor en la elevación de temperatura del motor

Motores de inducción pueden presentar una elevación de temperatura más elevada cuando alimentados por convertidores que cuando alimentados con tensión senoidal. Esta sobrelevación de temperatura es decurrente del incremento de las pérdidas del motor, en función de las componentes de alta frecuencia de la señal PWM, aliada a la frecuentemente reducida transferencia de calor decurrente de la variación de velocidad.

Las **distorsiones armónicas de la forma de ola de tensión** del motor alimentado por convertidor contribuyen para el incremento de las pérdidas, una vez que crean en el acero magnético lazos menores de histéresis, aumentando la saturación efectiva del núcleo, además de generar corrientes armónicas de alta frecuencia, que provocan un aumento de las pérdidas Joule en los conductores. Todavía, estos componentes de alta frecuencia no contribuyen para la producción de par del motor en régimen, una vez que no aumentan el flujo fundamental en el entrehierro, que gira en

la velocidad sincrónica. La operación del motor en bajas rotaciones provoca reducción en la ventilación y consecuente pérdida de resfriamiento (en motores autoventilados), causando también la elevación de temperatura de estabilización térmica.

Por tanto, cuando de la operación con convertidores, la influencia conjunta de ambos los factores citados arriba debe ser considerada. Básicamente hay las siguientes soluciones para evitar el sobrecalentamiento del motor:

- Reducción del par nominal (sobredimensionamiento del motor);
- Utilización de sistema de ventilación independiente;
- Utilización del “flujo óptimo” (solución exclusiva WEG).

6.4 Criterios, cuanto a la elevación de temperatura, para motores WEG alimentados por convertidores de frecuencia

El efecto de la variación de velocidad sobre la eficiencia del motor puede ser entendido a partir del análisis del gráfico de la potencia útil del motor alimentado por convertidor en función de su frecuencia de operación, ya presentado.

6.4.1 Reducción del par (Derating Torque)

Para mantener la temperatura de los motores de inducción WEG dentro de niveles aceptables, cuando alimentados por convertidor de frecuencia, deben ser obedecidos los límites de carga presentados en los criterios que siguen (observar la línea del motor y la condición de flujo magnético). NOTA: Motores para áreas clasificadas deben ser evaluados caso a caso y WEG debe ser consultada.

6.4.1.1 Para motores del mercado NEMA

MOTORES TCVE W21 Y W22 (“High Efficiency”)					
Tamaño de carcasa	Par Constante	Par Variable	Potencia Constante	Convertidor	Condición de flujo
143 – 587(**)	12:1	1000:1	60 – 120 Hz	Cualquier	Flujo constante
	100:1(*)	-	60 – 120 Hz	WEG(**)	Flujo óptimo
587(****)	4:1	1000:1	60 – 120 Hz	Cualquier	Flujo constante
	10:1	-	60 – 120 Hz	WEG(**)	Flujo óptimo
MOTORES TCVE NEMA Premium Efficiency					
Tamaño de carcasa	Par Constante	Par Variable	Potencia Constante	Convertidor	Condición de flujo
143 – 587(**)	20:1	1000:1	60 – 120 Hz	Cualquier	Flujo constante
	1000:1(*)	-	60 – 120 Hz	WEG(**)	Flujo óptimo
587(****)	6:1	1000:1	60 – 120 Hz	Cualquier	Flujo constante
	12:1	-	60 – 120 Hz	WEG(**)	Flujo óptimo

(*) El buen desempeño del motor depende de la correcta parametrización del drive – WEG debe ser contactada

(**) Convertidor CFV-09 versión 2.40 o arriba, cuando operando en modo vectorial sensorless (loop abierto)

(***) Motores con potencia nominal ≤ 250 hp. Criterios válidos también para motores de la carcasa 447/9

(****) Motores con potencia nominal > 250 hp. Criterios válidos también para motores de la carcasa 447/9

Los rangos de velocidades establecidos en la tabla arriba están relacionados únicamente con la capacidad térmica del motor. El ajuste de la velocidad depende del modo de operación del convertidor y de su ajuste correcto. Bajo solicitud, motores W21 y NEMA Premium Efficiency de todos los tamaños de carcasa también pueden recibir ventilación forzada. En estos casos el motor estará apto a las aplicaciones 1000:1 con cargas de par constante y variable, cualquier que sea el convertidor. Los motores WEG High Efficiency y NEMA Premium Efficiency atienden a las recomendaciones de la NEMA MG1 Partes 30 y 31.

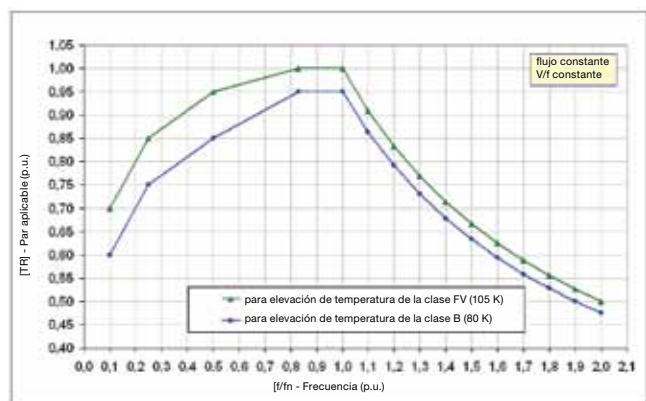
Las relaciones constantes en la tabla arriba describen el rango de frecuencias de operación de la máquina. Considerándose 60 Hz como frecuencia-base, por ejemplo, tenemos la siguiente equivalencia:

Relación	Rango de operación
4:1	15 – 60 Hz
10:1	6 – 60 Hz
12:1	5 – 60 Hz
20:1	3 – 60 Hz
100:1	0,6 – 60 Hz
1000:1	0,06 – 60 Hz

6.4.1.2 Para motores de los mercados IEC y ABNT

Condición de flujo constante:

Cobertura: Motores cerrados fabricados en serie atendiendo niveles de eficiencia de líneas – estándar (según NBR 17094-1) o IE1 (según IEC 60034-30) o arriba.



Condición de Flujo Óptimo®:

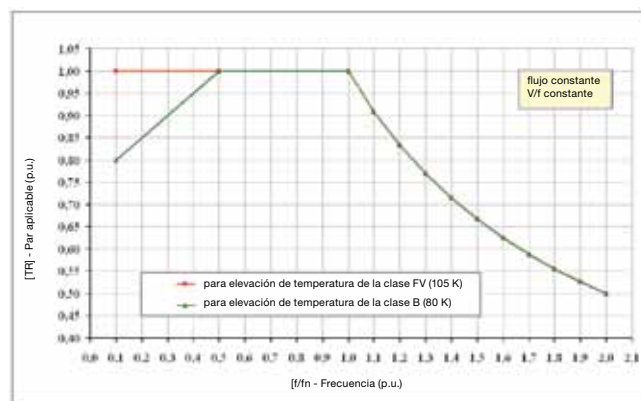
Cobertura: Motores cerrados fabricados en serie atendiendo niveles de eficiencia de líneas de alta eficiencia (según NBR 17094-1) o IE2 (según IEC 60034-30) o arriba. La solución Flujo Óptimo®, patentada por WEG, fue desarrollada con el objetivo de tornar los motores WEG aptos a operar en bajas frecuencias con par constante, manteniendo su temperatura adentro de los límites de la clase térmica, sin ventilación forzada o sobredimensionamiento de la carcasa. Ella está basada en la minimización de las pérdidas, fuentes generadoras de calor, a través de la optimización del flujo magnético del motor, parámetro controlado por el CFW-09 (convertidor de frecuencia WEG). A partir del estudio de la composición de todas las pérdidas de los motores eléctricos y de su relación con la frecuencia, el flujo y la corriente, bien

como de la influencia de la ventilación sobre la elevación de temperatura del motor, se encontró un valor óptimo de flujo para cada rotación, permitiendo la continua minimización de las pérdidas globales del motor a lo largo del rango de operación. La solución obtenida fue incorporada al CFW-09, de modo que la condición óptima de flujo magnético del motor es ajustada automáticamente por el convertidor, tornando mínimas las pérdidas totales del motor en cada frecuencia de operación, bastando para eso una parametrización adecuada – y sencilla – del convertidor.

Las pérdidas en el hierro varían sensiblemente con la frecuencia de operación. Conforme la frecuencia cae, las pérdidas en el hierro también son reducidas. Entonces en bajas frecuencias de operación es interesante aumentar la inducción (densidad de flujo magnético), pues el par puede ser mantenido constante con una corriente reducida, o sea, menores pérdidas Joule. Así, conforme la rotación reduce, es posible reducir la tensión proporcionalmente menos que la frecuencia, para que se obtenga una relación V/f óptima (mayor que la nominal del motor), que minimiza las pérdidas totales. Considerase para tanto que la mayor parcela de pérdidas del motor ocurre por efecto Joule en los conductores.

Esa solución fue especialmente concebida para aplicaciones en bajas frecuencias con cargas de par constante – no debiendo, por tanto, ser utilizada con cargas de par variable o arriba de la frecuencia base – y es posible solamente cuando:

- El motor es alimentado por convertidor WEG (CFW-09) versión 2.40 o arriba;
- Es utilizado control vectorial sensorless (loop abierto).



6.4.2 Par de Arranque

Con base en la NEMA MG1 Partes 30 y 31, el motor debe ser capaz de producir un par de arranque mínimo igual a 140% del par nominal, absorbiendo al máximo 150% de la corriente nominal, cuando alimentado por convertidor de frecuencia. Los motores WEG satisfacen tales exigencias.

6.4.3 Par Máximo

Arriba de la velocidad base, para operación en potencia constante, una tensión igual a la nominal del motor deberá ser mantenida, según ilustrado anteriormente. La NEMA MG1 Parte 31 prescribe que el par máximo en cualquier frecuencia adentro del rango de frecuencias definida no debe ser menor que 150% del par relativo aquella frecuencia, cuando tensión nominal para aquella frecuencia es aplicada. Los motores WEG, cuando alimentados por convertidores de frecuencia, satisfacen tales exigencias hasta la frecuencia de operación de 90 Hz. La máxima capacidad de par (par máximo) del motor limitará la velocidad máxima en la cual la operación en potencia constante es posible. Una forma aproximada de verificar el límite máximo de velocidad respetando los criterios de la norma NEMA citados arriba es aplicando la ecuación a seguir:

$$\text{RPM}_{\text{máx}} = \text{RPM}_{\text{base}} \times [(C_{\text{máx}} / C_{\text{nom}}) / 1,5]$$

6.5 Influencia del convertidor en el sistema aislante del motor

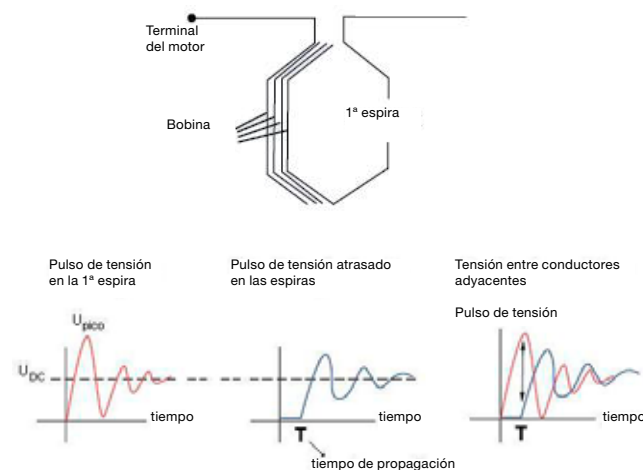
La evolución de los semiconductores de potencia tiene llevado a la creación de llaves más eficientes, pero, más rápidas. Las elevadas frecuencias de conmutación de las llaves electrónicas empleadas en los convertidores actuales (comúnmente transistores IGBT) provocan algunas consecuencias no deseadas, tales como el aumento de la emisión electromagnética y la probable incidencia de picos de tensión, bien como elevados valores de dV/dt (tasa de variación de la tensión en el tiempo), en los terminales de los motores alimentados por convertidores. Dependiendo de las características de control (resistores de gate, capacitores, tensiones de comando, etc.) y de la modulación PWM adoptada, cuando estos convertidores son utilizados en conjunto con un motor de inducción de jaula, los pulsos, en combinación con las impedancias del cable y del motor, pueden generar, de manera repetitiva, sobretensiones en los terminales del motor. Estos trenes de pulsos pueden reducir la vida del motor por la degradación del su sistema de aislamiento.

El cable y el motor pueden ser considerados un circuito resonante excitado por los pulsos rectangulares del convertidor. Cuando los valores de R, L y C son tales, que la tensión de pico atinge valores arriba de la tensión de la fuente ($V_{DC} \approx 1,35V_{nom}$), la respuesta del circuito a esta excitación es considerada un overshoot. Los overshoots afectan especialmente el aislamiento entre espiras de devanados aleatorios y su valor es determinado, básicamente, por los siguientes factores: **“rise time” del pulso de tensión, largo del cable, mínimo tiempo entre pulsos, frecuencia de conmutación y el uso de motores múltiples.**

6.5.1 Rise Time

Para transitar de su valor mínimo hasta su valor máximo, la tensión PWM requiere cierto tiempo, denominado rise time (tempo de subida). Debido a la gran velocidad de conmutación de los IGBTs de los convertidores, el

crecimiento de la frente de ola de tensión pasa muy rápidamente y, con el avance de la electrónica de potencia, estos tiempos de transición tienden a disminuir todavía más. Con la gran rapidez del crecimiento del pulso de tensión (dV/dt) emitido por el convertidor al motor, la(s) primera(s) espira(s) de la primera bobina de una determinada fase queda(n) sometida(s) a un alto valor de tensión. Debido a las características inductivas y capacitivas del enrollamiento del motor, ocurre amortiguamiento del pulso en las bobinas subsiguientes.

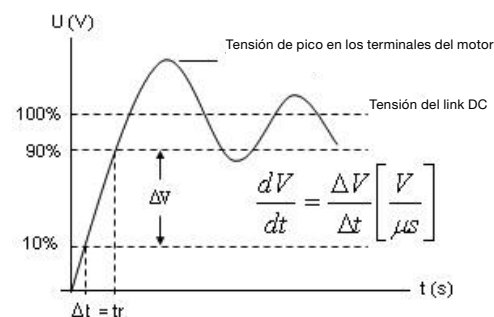


Con eso, el rise time (t_r) influencia directamente el tiempo de vida útil del aislamiento, pues cuanto menor es el tiempo de crecimiento del pulso, mayor será la tasa de variación de la tensión en el tiempo (dV/dt), originando mayor diferencia de potencial entre espiras y degradando más rápidamente el sistema aislante del motor. Debido a los altos gradientes de tensión a que el aislamiento es sometido cuando de la operación con convertidores, él debe poseer características dieléctricas superiores para estas aplicaciones.

6.5.1.1 Consideraciones normativas sobre el rise time

Las definiciones de rise time (t_r) dadas por la NEMA y por la IEC difieren, segundo ilustrado a seguido, dando margen a divergencias de interpretación y conflictos entre fabricantes y consumidores de motores y convertidores de frecuencia.

NEMA MG1 Part 30



t_r : tiempo que la tensión lleva para subir desde 10 hasta 90% de la tensión del link DC ($\approx 1,41V_{nom}$)

Cálculo del dV/dt por el criterio NEMA

Suponiendo la tensión del motor $V_{nom} = 460 \text{ V}$

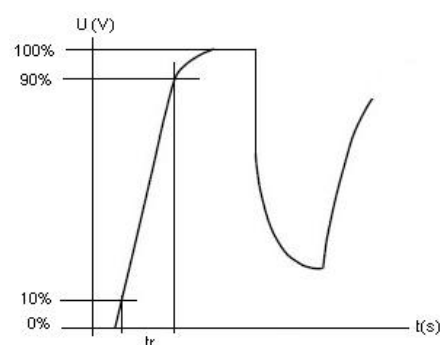
$$V_{link \text{ DC}} \cong 1,41 \times 460 = 648,6 \text{ V}$$

$$\Delta V = 0,8 \times 648,6 = 518,9 \text{ V}$$

Asumiendo un rise time de $0,1 \mu\text{s}$
 $\Delta t = 0,1 \mu\text{s}$

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{518,9}{0,1} = 5189 \left[\frac{\text{V}}{\mu\text{s}} \right]$$

IEC 60034-25



t_r : tiempo que la tensión lleva para subir desde 10 hasta 90% de la tensión del link DC ($\cong 1,41V_{nom}$)

Cálculo del dV/dt por el criterio IEC

Suponiendo la tensión del motor $V_{nom} = 460 \text{ V}$
 (con incidencia de picos de 1200 V)

$$\Delta V = 0,8 \times 1200 = 960 \text{ V}$$

Asumiendo $t_r = 0,25 \mu\text{s}$:

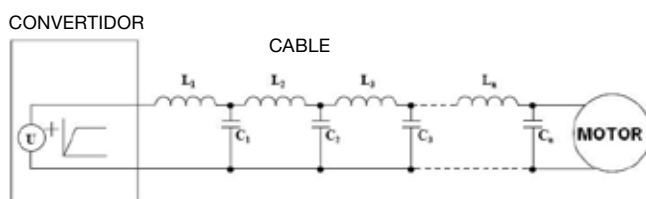
$$\frac{dV}{dt} = \frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{960}{0,25} = 3840 \left[\frac{\text{V}}{\mu\text{s}} \right]$$

NOTA: Por efecto del cable, el rise time es mayor en los terminales del motor de que en los terminales del convertidor. Un error bastante común es considerar, en el cálculo del dV/dt , el rise time en los terminales del convertidor y la tensión de pico en los terminales del motor, generando un valor de dV/dt absurdo. Por ejemplo, considerando en el caso arriba $t_r = 0,1 \mu\text{s}$ (valor típicamente encontrado en el convertidor), el dV/dt resultaría ¡9600 $\text{V}/\mu\text{s}$! Debido a las diferencias existentes entre las definiciones de rise time de la NEMA y de la IEC, ocurren frecuentemente

confusiones en el cálculo del dV/dt . Por el criterio NEMA se debe tomar el valor de la tensión del link DC ($\cong 1,41 V_{red}$) como referencia de 100% de tensión para la determinación del rise time (informado por el fabricante del convertidor) y el cálculo del dV/dt . Ya por el criterio IEC, el valor de pico de la tensión en los terminales del motor es que debe ser usado como referencia. Por efecto del cable, el rise time a ser considerado en el criterio IEC será normalmente mayor que lo considerado en el criterio NEMA (que es el valor informado por el fabricante del convertidor). Así se puede percibir que dependiendo del criterio utilizado en el cálculo, pueden ser considerados valores de dV/dt bastante distintos para una misma situación. Los criterios de aislamiento de los motores WEG son definidos con base en la NEMA, para que independan de las instalaciones del consumidor final. El criterio NEMA parece adecuado por considerar solamente la región lineal de la curva en la aproximación de la derivada ($dV/dt \cong \Delta V/\Delta t$). El criterio IEC considera la tensión de pico en los terminales del motor, algo extremadamente difícil de ser previsto o estimado a priori. El rise time en los terminales del motor es aumentado por la impedancia distribuida del cable. El valor del dV/dt en los terminales del motor (más blando de que en los terminales del convertidores) puede también ser calculado, pero requiere la medición del pulso de tensión en la entrada del motor y en la mayoría de las veces esta medición es difícil de ser ejecutada, necesitando de un técnico que conozca el tema y de un osciloscopio de buena cualidad.

6.5.2 Largo del cable

Los factores predominantes para la incidencia de picos de tensión en los terminales del motor alimentado por convertidor son el rise time y el largo del cable. El cable puede ser considerado una línea de transmisión, o sea, impedancias distribuidas en secciones de inductancias/capacitancias conectadas en serie/paralelo. A cada pulso, el convertidor entrega energía al cable cargando estas inductancias y capacitancias.

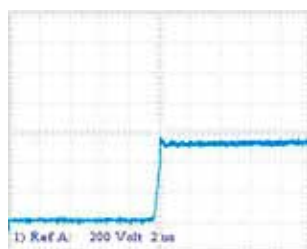


El cable es como una línea de transmisión compuesta por impedancias distribuidas.

La señal llega al motor a través del cable y es parcialmente reflejado, ocasionando sobretensión, pues la impedancia de alta frecuencia en la entrada del motor es mayor do que la impedancia del cable. Largo de cables elevados generalmente incrementan el valor del overshoot en los terminales del motor. De acuerdo con el NEMA Application Guide for AC ASD Systems, con los modernos IGBTs los overshoots empiezan a aparecer a partir de aproximadamente 3 m del cable, pudiendo llegar a 2 veces el valor de la tensión de la fuente para largo de cable de 15 m y a valores superiores a este, para largo de cables arriba de 120 m, por ejemplo, además del overshoot permanecer existiendo por más tiempo en estas situaciones. Este

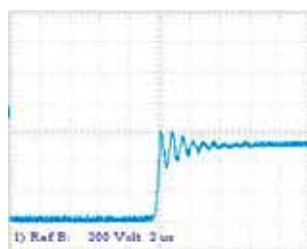
comportamiento varía en función del padrón de pulsos PWM, del rise time y del propio tipo de cable. Las figuras abajo ilustran las tensiones medidas en la salida del convertidor (sin cable) y en los terminales del motor ($V_{nom} = 400\text{ V}$) con distintos largos de cable. Son ejemplos solamente, pues los niveles de los overshoots dependen del tipo de cable.

Terminales convertidor



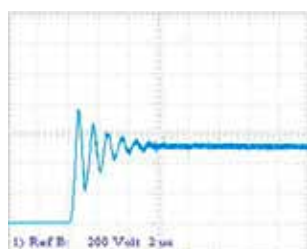
$$V_{pico} = 560\text{ V}$$

20 metros de cable



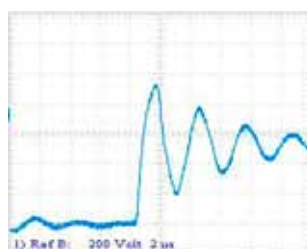
$$V_{pico} = 630\text{ V}$$

30 metros de cable



$$V_{pico} = 750\text{ V}$$

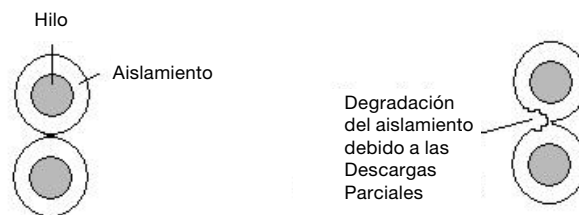
100 metros de cable



$$V_{pico} = 990\text{ V}$$

6.5.2.1 Efecto Corona

Dependiendo de la calidad/homogeneidad del sistema de impregnación, el material impregnador puede contener burbujas de aire (vacíos), en las cuales se desarrolla el mecanismo de falla del aislamiento entre espiras. La deterioración del aislamiento del motor debido a los overshoots de tensión ocurre por medio de las Descargas Parciales, fenómeno complejo decurrente del efecto Corona. Entre conductores energizados adyacentes hay una diferencia de potencial relativa, que resulta en un campo eléctrico. Si se establece un campo eléctrico suficientemente alto (más abajo de la tensión de ruptura del material aislante), la rigidez dieléctrica del aire puede ser rota, o sea, si hay energía suficiente, el oxígeno (O_2) es ionizado en ozono (O_3). El ozono es altamente agresivo y ataca los componentes orgánicos del sistema aislante, deteriorándolos. Para que eso ocurra, el potencial en los conductores necesita exceder un valor límite denominado CIV (Corona Inception Voltage), que es la rigidez dieléctrica del aire "local" (adentro de la burbuja). El CIV depende del diseño del devanado, tipo de aislamiento, temperatura, características superficiales y humedad.



Efecto de las Descargas Parciales en el sistema aislante del motor



Aislamiento desgastado por la acción de descargas parciales

Por tanto, las descargas parciales son descargas de baja energía que, si actúan continuamente, degradan prematuramente el aislamiento del motor. La erosión resulta en la disminución del espesor del material aislante, ocasionando progresivas pérdidas de propiedades dieléctricas, hasta que la tensión de ruptura atinja un nivel abajo del nivel de pico de la tensión aplicada, ocasionando entonces la falla del aislamiento.

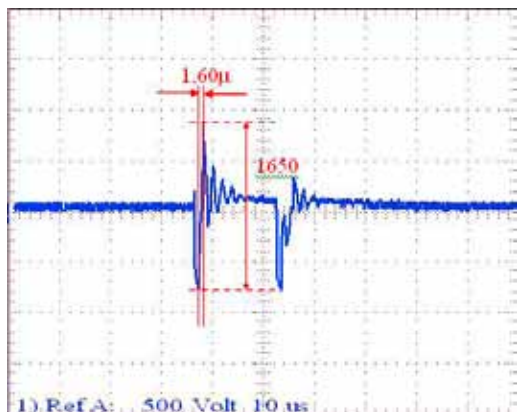
6.5.3 Mínimo tiempo entre pulsos consecutivos

Hay una sucesión de picos en la forma de ola de la tensión entregada por el convertidor al motor. Esta señal viaja a través del cable hasta atingir el motor con determinada velocidad de propagación. Así, la tensión que aparece entre espiras puede variar sobremanera, dependiendo de las características del devanado del motor y del tiempo entre pulsos consecutivos en la forma de ola de la tensión.

La tensión mediana aplicada sobre el motor es controlada por el ancho de los pulsos y por el tiempo entre ellos. El overshoot tórnase peor cuando el tiempo entre los pulsos es mínimo. Esta condición ocurre cuando son necesarias elevadas tensiones en la salida y durante regímenes transitorios, como aceleración y desaceleración del motor. Si el tiempo entre pulsos es menor que 3 veces el período resonante del cable (típicamente 0,2 hasta 2 μs para cables industriales), ocurrirá incremento en el overshoot. La única manera de saber si esta condición existe es la medición de los pulsos directamente o contactando el fabricante del convertidor.

Cuando el tiempo entre pulsos consecutivos es menor que 6 μs , se puede asumir que la diferencia de potencial entre espiras, principalmente cuando la primera y la última espira de un devanado aleatorio estuvieren lado a lado, es el valor pico a pico entre pulsos. El hecho ocurre debido a la rapidez de propagación del pulso, pues mientras en la primera espira

el valor de tensión es el valor pico a pico, en la última espira la tensión es muy baja, probablemente, cero. Arriba se muestra un ejemplo de tiempo entre pulsos consecutivos menor que $6\mu s$, en que efectivamente ocurrieron quemas de motores por corto entre espiras



6.5.4 Frecuencia de conmutación

Asociada a los efectos originados del rise time y del mínimo tiempo entre pulsos consecutivos, está la frecuencia con que los mismos son producidos. A lo revés de los eventuales impulsos provenientes de maniobras de red, en esto caso tratase de un tren de pulsos mantenido en una determinada frecuencia. En función de esta rápida evolución de la electrónica de potencia, esta frecuencia actualmente atinge valores de la orden de 20 kHz y, cuanto mayor es la frecuencia de conmutación (pulsación) del convertidor, más rápida será la degradación del sistema aislante. Estudios indican que la dependencia del tiempo de vida útil del aislamiento en función de la frecuencia de conmutación no es una relación sencilla, pero, experiencias realizadas en este sentido demuestran datos interesantes: **para frecuencias de conmutación ≤ 5 kHz** la probabilidad de falla de aislamiento es directamente proporcional a la frecuencia de conmutación, al paso que **para frecuencias de conmutación > 5 kHz** la probabilidad de falla del aislamiento es directamente proporcional al cuadrado de la frecuencia de conmutación.

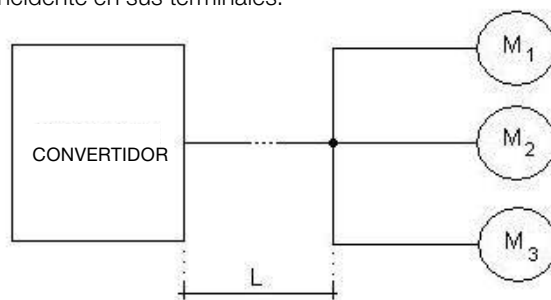
El incremento de la frecuencia de conmutación puede también ocasionar daños a los rodamientos. Por otro lado, el incremento de la frecuencia de conmutación mejora la serie de Fourier de la tensión inyectada en el motor, tendiendo, de esta manera, a mejorar el desempeño del motor en términos de temperatura y ruido.

6.5.5 Aplicaciones con múltiples motores

Si más de un motor es conectado al mismo convertidor, puede ocurrir overshoot debido a la reflexión entre motores. Esta situación es tan peor cuanto mayor es el largo del cable entre el convertidor y el punto común de conexión de los motores. El cable actúa como un desacoplador entre convertidor y motor.

Como resultado, reflexiones que serían absorbidas por la baja impedancia de salida del convertidor pueden ser

cargadas para un otro motor, amplificando así el overshoot incidente en sus terminales.



En la operación con múltiples motores, el largo "L" debe ser el menor posible.

6.6 Criterios de aislamiento para motores WEG alimentados por convertidor de frecuencia

En la utilización de motores de inducción trifásicos de baja tensión WEG con convertidores, para proteger el sistema de aislamiento del motor, deben ser obedecidos los criterios definidos a seguido. Si alguna de las condiciones presentadas en la tabla no sea satisfecha, debe ser instalado filtro entre el convertidor y el motor.

NOTA: Motores para áreas clasificadas deben ser evaluados caso a caso y WEG debe ser consultada.

Tensión nominal del motor	Tensión de pico en los terminales del motor	dV/dt en la salida del convertidor	Rise Time del convertidor*	Tiempo entre pulsos*
$V_{NOM} \leq 460$ V	≤ 1600 V	≤ 5200 V/ μs	$\geq 0,1 \mu s$	$\geq 6 \mu s$
460 V < $V_{NOM} \leq 575$ V	≤ 1800 V	≤ 6500 V/ μs		
575 V < $V_{NOM} \leq 690$ V	≤ 2200 V	≤ 7800 V/ μs		

* Informaciones suministradas por los fabricantes de convertidores.

Para el convertidor, la máxima frecuencia de conmutación recomendada es 5 kHz.

La humedad es un agente agresivo y debe ser evitada para garantizar mayor tiempo de vida al motor. Para mantener los devanados sin humedad, recomiéndase el uso de resistencias de calefacción.

El sistema aislante utilizado depende del rango de tensión de alimentación del motor y del tamaño de carcasa.

6.7 Consideraciones normativas sobre el aislamiento de motores accionados por convertidores de frecuencia

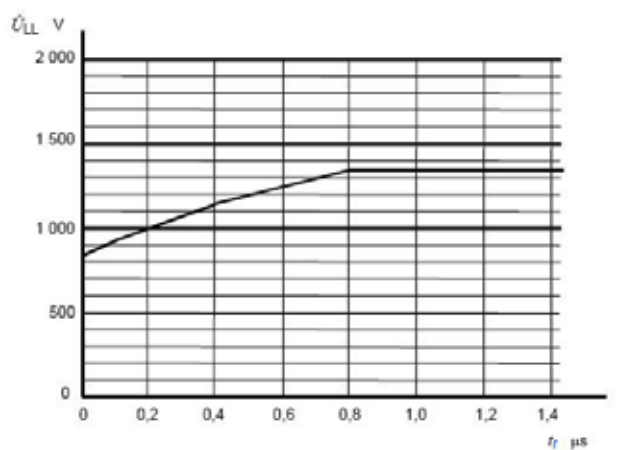
- NEMA MG1 – se a tensão de entrada do inversor não exceder a tensão nominal do motor e nos terminais do motor forem observados valores de tensão dentro dos limites estipulados abaixo, assume-se que não haverá significativa redução na vida útil do isolamento por stress de tensão.

Nema MG1 - Parte 30 Motores de uso general	Nema MG1 - Parte 31 Motores de uso específico
Para tensión ≤ 600 V : $V_{pico} \leq 1$ kV $Rise\ time \geq 2\mu s$	Para tensión > 600 V : $V_{pico} \leq 3,1 V_{nom}$ $Rise\ time \geq 0,1\mu s$
Para tensión ≤ 600 V : $V_{pico} \leq 2,04 V_{nom}$ $Rise\ time \geq 1\mu s$	Para tensión ≤ 600 V : $V_{pico} \leq 2,04 V_{nom}$ $Rise\ time \geq 1\mu s$

NOTA: El aislamiento de los motores WEG atiende a la norma NEMA MG1 Partes 30 y 31.

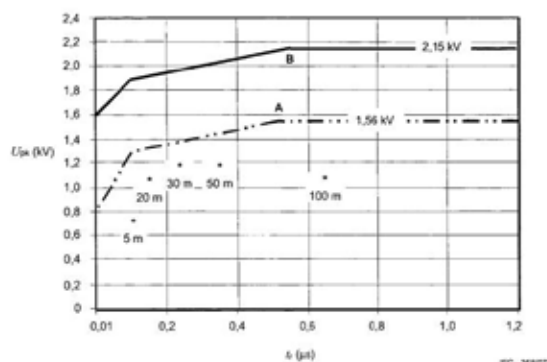
- IEC 60034 – para motores hasta 500 V el sistema de aislamiento debe soportar los niveles de V_{pico} ilustrados en la tabla abajo. Arriba de 500 V, el sistema aislante debe ser reforzado o hilos deben ser instalados en la salida del convertidor, para aumentar el rise time/limitar las tensiones de pico.

IEC 60034-17 Motores de uso general



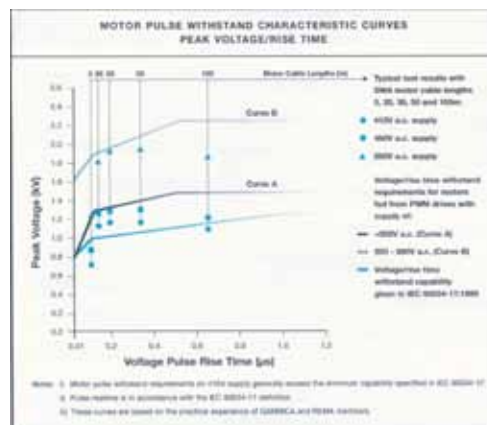
Curva válida para motores *Standard*

IEC 60034-25 Motores de uso específico



Curva A: Válida para motores hasta 500 Vca (sin filtros)
Curva B: Válida para motores hasta 690 Vca (sin filtros)
* Valores medidos con diferentes largos de cable y alimentación de 415 Vca

- GAMBICA/REMA – la asociación europea de fabricantes de motores (REMA) y convertidores (GAMBICA) establece los criterios abajo con base en la experiencia práctica de sus miembros.



Se puede percibir la semejanza de los criterios definidos por la IEC y por la GAMBICA y la disparidad de ambas en relación a los criterios NEMA, facto decurrente de las diferentes definiciones de rise time y dV/dt de acuerdo con cada organismo. Vale observar que tanto la IEC cuanto la GAMBICA llevan en consideración el largo del cable entre convertidor y motor, información que WEG también considera relevante.

6.8 Recomendaciones para los cables de conexión entre motor y convertidor WEG

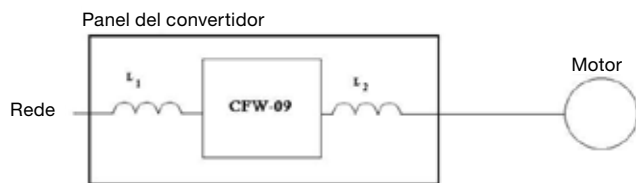
Según ya citado, el máximo pico de tensión incidiendo en los terminales del motor alimentado por convertidor de frecuencia depende de varios factores, adentre los cuales lo más importante es el largo del cable. Cuando de la utilización de motores con convertidores de frecuencia WEG, las siguientes reglas prácticas son sugeridas para la evaluación de la necesidad de utilización de filtros entre el motor y el convertidor:

Largo de cable L	Filtros de Salida
$L \leq 100$ m	No son necesarios
$100\text{ m} < L \leq 300$ m	Necesaria reactancia de salida (2% de caída de tensión mínima)
$L > 300$ m	Necesarios filtros especiales (consultar WEG)

La reactancia de salida es necesaria para limitar la corriente de fuga, que fluye de la salida del convertidor para la tierra. La reactancia de red evita el bloqueo del convertidor por actuación de su protección de falta de tierra.

La reactancia de salida deberá ser proyectada para soportar pérdidas adicionales ocasionadas por las oscilaciones de corriente del motor y por las corrientes de fuga para la tierra. Estas últimas aumentan en la medida que el largo del cable del motor aumenta. Para cables largos y reactancias proyectadas para pequeñas corrientes habrá una gran influencia de las corrientes de fuga en las pérdidas (y en el calentamiento de las reactancias). Las pérdidas adicionales de las reactancias deberán ser consideradas en la refrigeración de los tableros, de manera a garantizar operación en temperatura ambiente segura.

La reactancia de salida deberá ser posicionada próxima al convertidor, como ilustra la figura abajo.



L_1 = Reactancia de entrada (reactancia de red) – criterio de selección según ítem 5.2

L_2 = Reactancia de salida – deberá ser armada próxima al convertidor.

6.8.1 Tipos de cables y orientaciones de instalación

Las características del cable utilizado para conectar el convertidor al motor, bien como su interconexión y ubicación física, son de extrema importancia también para evitar interferencia electromagnética en otros aparatos.

6.8.1.1 Cables sin Blindaje

- Pueden ser utilizados cuando no sea necesario el cumplimiento de la directiva de compatibilidad electromagnética (89/336/EEC).
- Deben ser respetadas las distancias mínimas de separación de la fijación definidas abajo.
- La emisión electromagnética de los cables puede ser reducida con su instalación adentro de un conducto metálico, lo cual debe ser aterrado pelo menos en los dos extremos. El campo magnético creado por la circulación de corriente eléctrica en estos cables puede inducir corrientes en piezas metálicas próximas, causando pérdidas eléctricas adicionales y sobrecalentamiento de estas.

6.8.1.2 Cables blindados

- Actúan principalmente reduciendo la emisión irradiada por los cables del motor en el rango de radiofrecuencia.
- Obligatorios cuando huya la necesidad de atender a la directiva de compatibilidad electromagnética (89/336/EEC), según definido por la Norma de Producto EN 61800-3.
- Obligatorios también cuando hayan filtros de radiofrecuencia (internos/built-in o externos) instalados en la entrada del convertidor.
- Deben ser respetadas las distancias mínimas de separación entre los cables del motor y los demás cables de la instalación (por ejemplo: cables de señal, cables de comando, cables de sensores, etc.) definidas abajo.

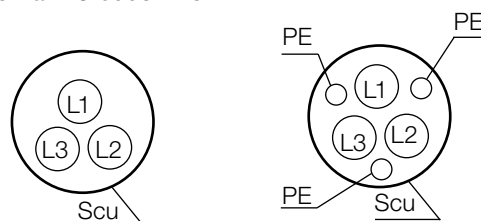
Separación entre los cables del motor (blindados o no) y los demás cables presentes en la instalación	
Largo de los hilos	Distancia mínima de separación
≤ 30 m	≥ 10 cm
> 30 m	≥ 25 cm

6.8.1.3 Recomendaciones de instalación

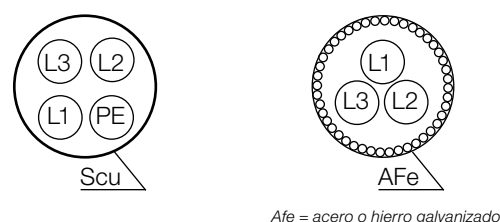
La IEC 60034-25 presenta tipos y pormenores de instalación.

Las recomendaciones básicas están resumidas en la tabla abajo, pero se sugiere consultar la norma para más detalles y eventuales modificaciones resultantes de revisiones. El sistema de aterramiento debe presentar una buena interconexión entre los diversos sitios de la instalación, como por ejemplo, entre los puntos de aterramiento del motor y del convertidor. Diferencias de potencial o impedancia entre distintos puntos de la malla de aterramiento puede provocar circulación de corrientes parasitas entre los equipamientos conectados a la tierra, llevando a problemas de interferencia electromagnética.

Tipos de cables para conexión del motor recomendados por la IEC 60034-25



Alternativas para conductores de hasta 10 mm²



Afe = acero o hierro galvanizado

PE = conductor de tierra

SCU = blindaje externa (cobre o aluminio)

Cables blindados simétricos: tres conductores concéntricos (con o sin conductores de tierra) construidos de manera simétrica + blindaje externa de cobre o aluminio.

El blindaje de los cables debe ser aterrado en ambos lados, convertidor y motor. Deben ser hechas conexiones de 360°, para que se obtenga baja impedancia para altas frecuencias.

Para que el blindaje actúe también como tierra de protección, él debe poseer por lo menos 50% de la conductibilidad de los conductores de fase. De lo contrario, conductor de tierra adicional debe ser utilizado externamente al cable blindado, quedando el blindaje como protección de EMC. La conductibilidad del blindaje para altas frecuencias debe ser por lo menos 10% de aquella de los conductores de fase.

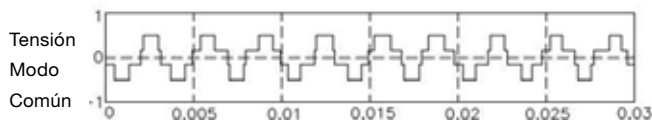
6.9 Influencia del convertidor en la corriente que circula por los cojinetes del motor (tensión inducida en el eje)

El fenómeno de tensión/corriente inducida en el eje se ha agravado con el advenio de los convertidores de frecuencia PWM, pues los motores pasaron a ser alimentados por formas de olas desequilibradas y con componentes de alta frecuencia. Por lo tanto, las causas de tensión inducida en el

eje debido a los convertidores de frecuencia son sumadas a aquellas intrínsecas al motor (por ejemplo, desequilibrio electromagnético causado por asimetría) y que también provocan la circulación de corriente por los cojinetes. La principal razón de corrientes circulantes por los cojinetes del motor accionado por convertidor estático son las tensiones modo común. Las impedancias capacitivas se ponen bajas adelante de las altas frecuencias producidas por el convertidor, ocasionando circulación de corriente por el camino formado por el rotor, eje y cojinete para la tierra.

6.9.1 Tensiones modo común

La tensión PWM trifásica de salida de un convertidor electrónico de frecuencia, diferentemente de la tensión trifásica senoidal, no es equilibrada, o sea, en función de la topología de la etapa convertidora, la suma vectorial instantánea de las tensiones en las tres fases no es igual a cero, pero igual a un potencial eléctrico de alta frecuencia relativo a un punto común de referencia, usualmente el tierra o el negativo del link DC, desde ahí la denominación modo común.



Tensión modo común: la suma de las tensiones en la salida del convertidor no es cero.

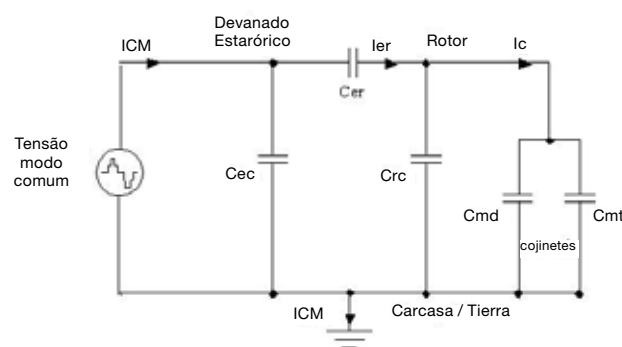
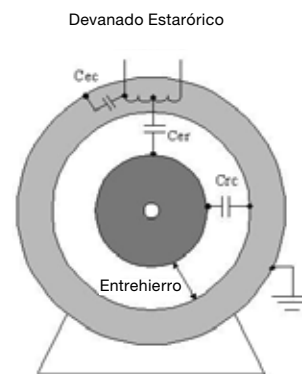
Corrientes de modo común indeseadas pueden resultar de esta tensión modo común de alta frecuencia y, habiendo capacitancias parasitas del motor para la tierra, la corriente tiende a fluir para la tierra a través de estas capacitancias parasitas, atravesando rotor, eje y cojinete para la tapa aterrada.

Experiencias prácticas demuestran, que las tensiones y corrientes modo común tienden a aumentar con frecuencias de conmutación más elevadas.

6.9.2 Circuito equivalente del motor para las corrientes capacitivas de alta frecuencia

Los caminos por los cuales viajan las corrientes de modo común pueden ser observados en el modelo del circuito equivalente del motor para altas frecuencias, en lo cual los cojinetes son representados por capacitancias.

El rotor es soportado por los cojinetes, que poseen una película de grasa no-conductiva. En altas velocidades no hay contacto entre el rotor y la pista externa del rodamiento (aterrada), debido a la distribución plana de la película de grasa. El potencial del rotor puede entonces aumentar con relación a la tierra hasta atngir un nivel capaz de romper la película de grasa, entonces ocurre la emisión de chispas y la corriente de descarga fluye a través de los rodamientos. Esta corriente circula cuando la película de grasa es momentáneamente rota y es denominada "componente de descarga capacitiva". Otra componente de corriente circula permanentemente por la espira característica formada por eje, cojinetes y carcasa y es denominada "componente de conducción".



C_{er} : capacitor formado entre el devanado estatórico y las chapas del rotor.

(Dieléctrico = entrehierro + aislante de ranura + aislamiento de los alambres)

C_{rc} : capacitor formado entre las chapas del rotor y del estator.

(Dieléctrico = entrehierro)

C_{ec} : capacitor formado entre devanado estatórico y carcasa.

(Dieléctrico = aislamiento de ranura + el aislamiento de los alambres)

C_{md} y C_{mt} : capacitancias de los cojinetes delantero y trasero, formadas por las pistas de desplazamiento de los anillos internos y externos, teniendo las bolas (o rodillos) metálicos en el interior.

(Dieléctrico = espacios entre las pistas de desplazamiento y las bolas + grasa del rodamiento)

I_{CM} : corriente total de modo común

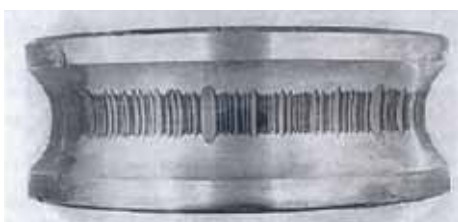
I_{er} : corriente de descarga capacitiva del estator para el rotor

I_c : corriente de descarga capacitiva por los cojinetes.

Estas descargas desgastan las bolas y la pista del rodamiento, dando origen a pequeños agujeros, que empiezan a sobreponerse y, caso haya corrientes de descarga por largos períodos, surcos (cráteres) serán formados. La erosión conduce a la reducción de la vida útil de los rodamientos y puede provocar falla de la máquina.



Cráter ocasionado por electroerosión en la pista interna del rodamiento.



Pista de rodamiento dañada debido a la circulación de corriente eléctrica por el cojinete.

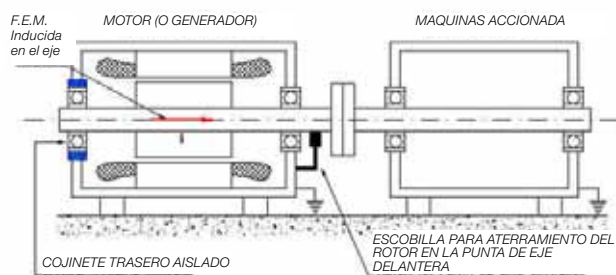


Rayado (fluting) causado por la corriente eléctrica en el cojinete.

6.9.3 Métodos para evitar o minimizar la circulación de corriente eléctrica por los cojinetes del motor alimentado por convertidor

Débase impedir la circulación de corriente a través de los cojinetes llevándose en cuenta las componentes de conducción (inducidas en el eje) y las componentes de descarga capacitiva (resultantes de la tensión modo común). Para eliminar las corrientes circulantes en la espira característica es suficiente aislar los cojinetes del motor. Para eliminar las componentes de origen capacitiva, pero, sería necesario aislar también los cojinetes de la máquina accionada, para evitar la migración de cargas eléctricas del motor para el rotor de la máquina accionada a través de los ejes eléctricamente conectados en los casos de acoplamientos no-aislados. Otra manera de eliminar la componente de origen capacitiva consiste en cortocircuitar el rotor y la carcasa del motor con escobilla deslizante de grafito. Así la circulación de la componente inductiva en la espira característica es eliminada aislandose solamente uno de los cojinetes del motor, mientras la componente capacitiva y la transferencia de las cargas capacitivas del motor para la máquina accionada son eliminadas por el cortocircuito realizado a través de la escobilla.

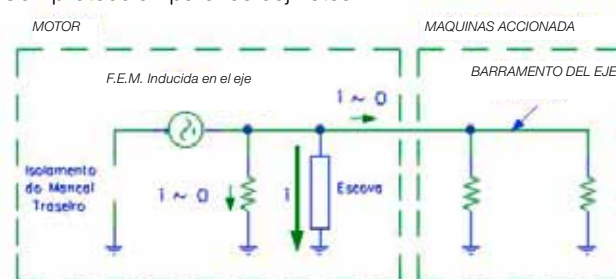
Motor con una punta de eje motriz



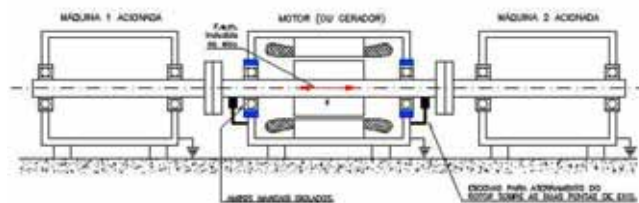
Sin protección para los cojinetes:



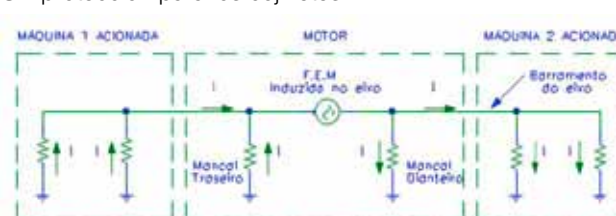
Con protección para los cojinetes:



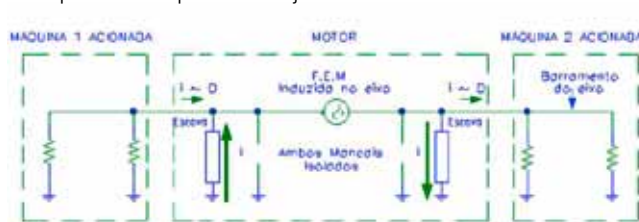
Motor con doble punta de eje motriz



Sin protección para los cojinetes:



Con protección para los cojinetes:



6.10 Criterios, cuanto la corriente por los cojinetes (tensión en el eje), para motores de inducción WEG alimentados por convertidores

Plataforma	Tamaño de carcasa (ABNT)	Estándar	Opcional
W21 W22	mod < 315	Sin protección	Consultar WEG
W21 W22	315 e 355	Sin protección*	Un cojinete aislado
			Ambos cojinetes aislados
			Aterramiento entre eje y carcasa por medio de escobilla (kit de aterramiento del eje)
HGF	315 ≤ mod ≤ 630	Cojinete trasero aislado	Ambos cojinetes aislados
		Aterramiento entre eje y carcasa por medio de escobilla (kit de aterramiento del eje en la delantera)	
M	280 ≤ mod ≤ 1800	Cojinete trasero aislado	Ambos cojinetes aislados
		Aterramiento entre eje y carcasa por medio de escobilla (kit de aterramiento del eje en la delantera)	

* Para motores de la línea "Inverter Duty", el kit de aterramiento del eje es ítem estándar de la Línea

NOTA: Motores para áreas clasificadas deben ser evaluados caso a caso – consultar WEG.

- IEC 60034-17 – para carcassas arriba de la 315 recomiéndase utilizar en la salida del convertidor filtro para reducción de la componente de secuencia cero de las tensiones de modo común de fase, reducir el dV/dt o aislar el(los) rodamiento(s). La necesidad de aislamiento de ambos rodamientos es rara. En caso del análisis de todo el sistema de accionamiento (convertidor + motor + máquina accionada), aislar el acoplamiento entre el motor y la máquina accionada. El sistema de aterramiento normalmente utiliza escobillas de aterramiento.
- IEC 60034-25 – no especifica una carcasa a partir de la cual sería necesario proteger los cojinetes. En el ítem que aborda los efectos de asimetría magnética de los motores, como causa de tensión en el eje y corriente por los cojinetes, es citado que las corrientes por los cojinetes ocurren más comúnmente en motores mayores que 400 kW. Para las otras causas, no son citados los tamaños de carcasa.

El tipo de solución para evitar las corrientes por los cojinetes, presentado en este documento, depende de la componente de corriente que se desea evitar. Las soluciones se alternan entre cojinetes aislados y/o escobilla de aterramiento en el eje.

- CSA 22.2 N°100 Item 12 – escobillas de aterramiento en el eje deberán ser utilizadas en motores con carcassas mayores que la IEC 280 (NEMA 440).
- Gambica/REMA Technical Guide – para motores de carcassas menores que la IEC 280 los efectos de la corriente por los cojinetes son mínimos. En estos casos, ningún tipo de protección es necesario. Para motores con carcassas mayores que la IEC 280, los efectos de las corrientes por los cojinetes ya son significativos y ciertas protecciones son necesarias: motor con cojinete trasero aislado y aterramiento del eje, evitando cortocircuitar el lado del cojinete/rodamiento aislado.

6.11 Consideraciones normativas sobre las corrientes que circulan por los cojinetes de los motores accionados por convertidores

- NEMA MG1 Part 31 – con alimentación senoidal (red), la presencia de tensión en el eje / corriente en los cojinetes ocurre generalmente en motores desde la carcasa 500 y mayores. Pero, en aplicaciones con convertidores de frecuencia las corrientes por los cojinetes tienen ocurrido ocasionalmente en motores de carcassas menores. La interrupción de estas corrientes requiere el aislamiento de ambos rodamientos.

Alternativamente, escobillas de aterramiento en el eje pueden ser usadas para desviar la corriente sobre los rodamientos.

Debe ser observado que el aislamiento de los rodamientos no irá a prevenir daños del equipamiento conectado al eje del motor.

- NEMA Application Guide for AC ASD Systems – las componentes de corriente por los cojinetes debido a la tensión de modo común (alimentación con convertidor) pueden causar problemas en motores con tamaños de carcasa menores que 500 (probablemente en las carcassas 400 y mayores). La solución para el problema es el cojinete aislado y/o escobilla de aterramiento en el eje.

6.12 Influencia del convertidor en el ruido acústico emitido por el motor

Las máquinas eléctricas girantes poseen básicamente tres fuentes de ruido:

- El sistema de ventilación
- Los rodamientos
- Origen electromagnética

Cuando los rodamientos están en buen estado, el ruido generado por ellos es prácticamente insignificante, comparado con el ruido generado por otras fuentes. Motores alimentados con tensión senoidal, principalmente aquellos de polaridades más bajas (rotaciones más elevadas), tienen en el sistema de ventilación su principal fuente de ruido. Ya en los motores de polaridades mayores y rotaciones menores frecuentemente sobresale el ruido de origen electromagnética. Por otro lado, en accionamientos de velocidad variable – especialmente en las bajas frecuencias de operación, en las cuales el ruido debido a la ventilación disminuye – el ruido electromagnético puede ser la mayor fuente de ruido para motores de cualquier polaridad, debido al contenido armónico de la tensión. El aumento de la frecuencia de conmutación tiende a reducir el ruido de origen electromagnética de los motores.

6.13 Criterios de ruido para motores WEG accionados por convertidores

Resultados de pruebas de laboratorio (mediciones de 4 puntos efectuadas en cámara acústica semianecoica con el convertidor puesto afuera de la cámara) realizados con diversos motores y convertidores utilizando diversas frecuencias de conmutación tiene mostrado que los motores de inducción trifásicos WEG, cuando alimentados por convertidores de frecuencia PWM y operando en la rotación nominal (típicamente 50 o 60 Hz), presentan como máximo 11 dB(A) de incremento en su nivel de presión sonora global.

6.14 Consideraciones normativas sobre el ruido de motores accionados por convertidores

- NEMA MG1 Part 30 – El nivel de ruido depende de la construcción del motor, del número de polos, de la frecuencia de conmutación y del padrón de pulsos del convertidor, de la frecuencia fundamental y de la velocidad de operación del motor. La respuesta en frecuencia del equipamiento accionado también debe ser considerada. Así, los niveles de ruido producidos serán mayores que los valores anunciados por el fabricante, cuando de la operación arriba de la rotación nominal. En ciertas frecuencias, la resonancia mecánica o el ruido magnético pueden aumentar sensiblemente los niveles de ruido, aunque un cambio en la frecuencia y/o tensión pueda reducir este ruido. La experiencia tiene mostrado que, típicamente en la frecuencia nominal, un incremento de 5 hasta 15 dB(A) en el nivel de ruido puede ocurrir, cuando los motores son alimentados con tensión PWM. Para otras frecuencias los niveles de ruido pueden ser todavía más elevados.
- IEC 60034-17 – debido a las armónicas el mecanismo de excitación para el ruido magnético tórnase más complejo que si comparado con régimen senoidal y resonancias pueden ocurrir en frecuencias particulares adentro del rango de operación. Experiencias demuestran, que con tensión y frecuencia nominales, probablemente habrá incremento en el ruido desde 1 hasta 15 dB(A).
- IEC 60034-25 – la operación con convertidor afecta directamente el ruido emitido por el motor por tres factores: variaciones en la velocidad de rotación, que influyen el desempeño de los rodamientos y sistema de ventilación del motor (además de otras características sensibles a variaciones de temperatura); contenido armónico de la señal, que afectan en gran escala ruido magnético excitado en el núcleo del estator y, en menor escala, el ruido producido en los cojinetes; y oscilaciones de par, debido a la interacción de olas de distintas frecuencias del campo magnético en el entrehierro del motor. El incremento del ruido emitido por el motor debido a la operación con convertidor (en relación a la alimentación senoidal) será relativamente pequeño para frecuencias de conmutación arriba de 3 kHz, pero podrá llegar a 15 dB(A) para conmutaciones más lentas, de acuerdo con la experiencia.

6.15 Influencia del convertidor en la vibración mecánica del motor

Interacciones entre las armónicas de corriente y de flujo pueden resultar en fuerzas parasitas actuando sobre el motor y ocasionando vibraciones mecánicas, además de contribuir para el incremento global de los niveles de ruido. Este mecanismo gana importancia especialmente cuando amplificado por resonancias mecánicas en el motor o en la máquina accionada. Si alguna de las armónicas “no-fundamentales” esté próxima de las frecuencias naturales del motor, las fuerzas producidas pueden excitar modos de vibración.

Tales efectos pueden ser atenuados si son tomados cuidados en el diseño del motor, con relación a las ranuras estáticas y rotóricas, chapas y carcasa, buscando siempre simplificar el sistema mecánico y reducir la posibilidad de excitar frecuencias naturales y desarrollar modos de vibración.

Los convertidores actuales también poseen herramientas para contornar tales problemas, así frecuencias específicas adentro del rango de operación pueden ser evitadas (skip frequency) y las rampas de aceleración y desaceleración son ajustables.

6.16 Criterios de vibración para motores WEG accionados por convertidores

Pruebas realizadas con motores y convertidores diversos, siguiendo los procedimientos recomendados por la IEC 60034-14 (medición en tres direcciones perpendiculares, con el motor operando sin carga apoyado sobre una base elástica debidamente dimensionada), confirmaron que la vibración de los motores de inducción aumenta cuando estos son accionados por convertidores de frecuencia. De un modo general, el incremento de velocidad de vibración fue menor para la mayor frecuencia de conmutación del convertidor. O sea, mayores frecuencias de conmutación tienden a reducir la vibración mecánica del motor de inducción accionado por convertidor.

En todos los casos, mismo en aquellos arriba de la frecuencia base, los motores WEG presentaron valores de velocidad de vibración RMS (mm/s) debajo de los límites establecidos por las normas IEC 60034-14 y NEMA MG1 – Parte 7, atendiendo, por lo tanto, a los criterios exigidos.

6.17 Consideraciones normativas sobre vibración, para motores accionados por convertidores

- NEMA MG1 Part 30 – Es posible, que algunas frecuencias adentro del rango de operación correspondan a frecuencias mecánicas naturales del motor o de la estructura. En estas situaciones la operación más que momentánea en las velocidades críticas debe ser evitada, pues causaría daños al motor o a la carga.
- NEMA MG1 Part 31 – La vibración y el ruido de la máquina son influenciados por los siguientes parámetros: proyecto electromagnético; tipo de convertidor; resonancia de la

estructura y del involucro de la carcasa; rigidez, masa y configuración del soporte; reflexiones de ruido y vibración por la carga o acoplamiento del eje; ventilación.

- IEC 60034-17 – Las oscilaciones de par causadas por las armónicas ocasionan vibraciones torsionales en el sistema mecánico, al revés de los pares asincrónicos, que poco afectan la operación del accionamiento de velocidad variable. En accionamientos con convertidores PWM las frecuencias dominantes del par oscilante son determinadas por la frecuencia de los pulsos, mientras sus amplitudes dependen del ancho del pulso. Pares oscilantes en dos veces la frecuencia de conmutación son generados, pero, normalmente no llegan a perjudicar el sistema, pues su frecuencia está muy arriba de las frecuencias mecánicas críticas. Conmutaciones elevadas (de orden de 21 veces la frecuencia fundamental) tienden a mejorar el par / reducir la oscilación.
- IEC 60034-25 – Si el convertidor posee características de salida apropiadas y si fueren tomados los debidos cuidados con las características mecánicas y el ensamble del motor, serán producidos niveles de vibración similares a aquellos obtenidos con régimen senoidal, no habiendo, por tanto, la necesidad de establecer criterios de vibración distintos de aquellos ya definidos por la IEC 60034-14 para alimentación senoidal. Niveles de vibración obtenidos con el motor desacoplado sirven como indicativos de calidad del motor, pero cuando el motor es instalado finalmente y acoplado al equipamiento accionado, el nivel de vibración podrá ser bastante alterado.

7 Interacción entre el motor y la carga accionada

7.1 Tipos de carga

El correcto dimensionamiento del sistema de velocidad variable depende del conocimiento del comportamiento de la carga, o sea, de la demanda de par en la punta de eje del motor. Las cargas pueden ser clasificadas en tres tipos: par variable, par constante y potencia constante.

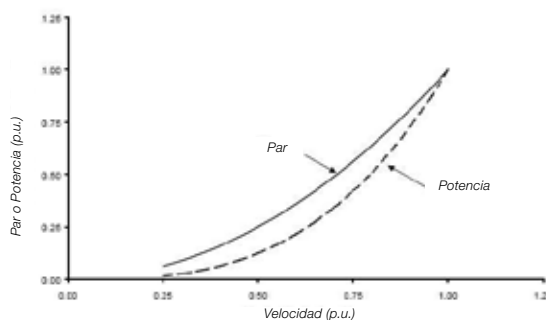
7.1.1 Cargas de par variable

Ejemplos típicos:

- Bombas centrífugas
- Sopladores centrífugos
- Ventiladores
- Compresores centrífugos

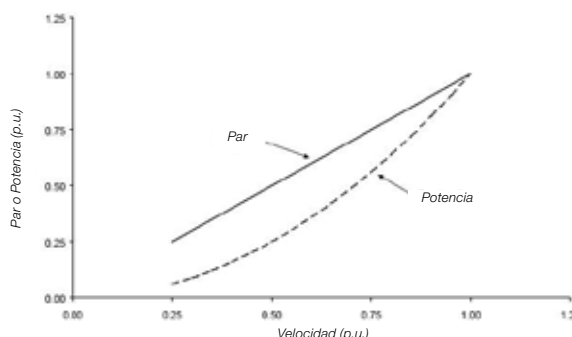
La variación de la velocidad por medio de accionamiento electrónico permite grandes ahorros de energía con este tipo de carga, una vez que la potencia mecánica disponible en la salida del motor no será constante, pero variará convenientemente de acuerdo con la exigencia de la carga, según presentado en el ítem 3 de esta guía técnica.

Variación cuadrática del par



- Par varía con el cuadrado de la velocidad
- Potencia varía con el cubo de la velocidad
- Potencia y par nominales en la velocidad-base

Variación lineal del par

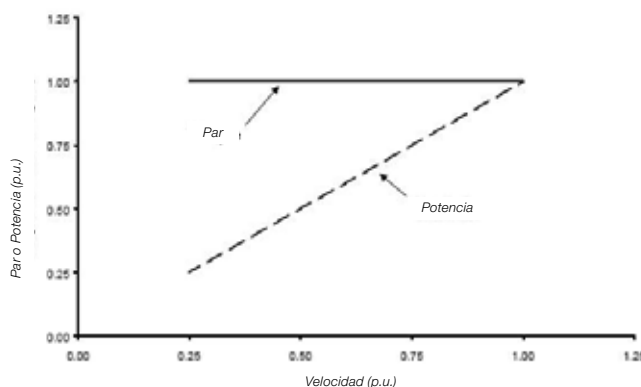


- Par varía linealmente con la velocidad
- Potencia varía con el cuadrado de la velocidad
- Potencia y par nominales en la velocidad-base

7.1.2 Cargas de par constante

Ejemplos típicos:

- Compresores alternados
- Compresores helicoidales
- Elevadores de carga
- Cintas transportadoras
- Bombas de desplazamiento positivo
- Extrusoras
- Trituradoras

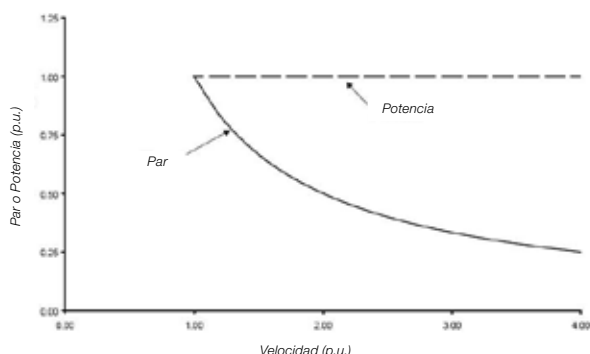


- Par de la carga es constante durante todo el rango de velocidad
- Potencia varía linealmente con la velocidad de operación
- Potencia y par nominales en la velocidad-base

7.1.3 Cargas de potencia constante

Ejemplos típicos:

- Herramientas de mecanizado
- Embobinadoras



- Par de la carga cae proporcionalmente a la frecuencia con el aumento de la velocidad
- Potencia resulta constante durante todo el rango de operación
- Potencia y par nominales en la velocidad-base

7.2 Regímenes de operación

7.2.1 Régimen de velocidad variable

Motores designados para la operación en régimen de velocidad variable trabajan sobre un rango continuo de frecuencias de operación. Así, del punto de vista de proyecto, el motor tiene la ventaja de operar más frío en algunas velocidades al largo del rango de operación.

7.2.2 Régimen de velocidad constante

Motores designados para la operación en régimen de velocidad constante pueden operar continuamente en cualquier velocidad adentro del rango de operación. En el diseño, se considera que él trabajará por un periodo de tiempo indefinido con carga nominal (igual de la frecuencia-base) en la velocidad que resultará en la mayor elevación de temperatura.

8 Dimensionamiento y análisis de accionamientos eléctricos con velocidad variable – Ejemplos prácticos

8.1 Aplicación con compresor (par constante)

8.1.1 Ejemplo

Dimensionar el motor de inducción de jaula WEG Estándar autoventilado para operar con cualquier convertidor de frecuencia WEG de tipo PWM en el rango de rotación desde 180 hasta 1800 rpm, accionando un compresor con par resistente de 3,5 kgfm. Se desea una elevación de

temperatura de 80 K en los devanados del motor.

Datos generales:

- Red: 380 V / 60 Hz / Trifásica
- Ambiente: temperatura máxima 40°C; 1000 m altitud; atmósfera normal
- Convertidor CFW-09: $t_r = 0,1 \mu s$; $f_{chav} = 5 \text{ kHz}$

8.1.2 Resolución

8.1.2.1 Cuanto a la elevación de temperatura (derating)

Los compresores son caracterizados por poseer par constante en todo el rango de la variación de la rotación. El dimensionamiento del motor debe ser realizado para la peor situación de operación, en este ejemplo, el punto de menor rotación, pues la ventilación del motor es mínima y la demanda de par continúa constante.

Considerando que la rotación varía desde 180 rpm hasta 1800 rpm y que la frecuencia base de operación es 60 Hz, entonces el motor elegido debe tener 4 polos. Despreciando el deslizamiento, la potencia exigida por la carga en el punto base de operación será:

$$T_L (\text{kgfm}) = \frac{716 \cdot P(\text{cv})}{n(\text{rpm})} \Rightarrow P = \frac{3,5 \cdot 1800}{716} = 8,8 \text{ cv}$$

Sin embargo, la peor situación de operación de este motor autoventilado cuanto a la elevación de temperatura ocurre en la rotación de 180 rpm, en la cual la frecuencia es de solamente 6 Hz (la menor adentro del rango de operación) y la ventilación es mínima. Por lo tanto, débese calcular la reducción de par para esta rotación.

De acuerdo con los criterios WEG de reducción de par (ítem 6.4.1.2), para que se obtenga elevación de temperatura de la clase B en la frecuencia de operación de 6 Hz, débese reducir el par del motor en 60%. Se considera en este caso condición de V/f constante, pues la solicitud está para cualquier convertidor de frecuencia WEG y la solución flujo óptimo solo es posible con motores de Alta Eficiencia WEG alimentados por convertidores WEG versión 2.40 o posterior.

$$f = 6 \text{ Hz} \Rightarrow f/f_n = 6/60 = 0,10 \text{ p.u.}$$

$$f/f_n = 0,10 \text{ p.u.} \Rightarrow T_r = 0,6 \text{ p.u.}$$

O sea, en la rotación de 180 rpm el motor podrá suministrar solamente 60% de su par nominal. Sin embargo, como la exigencia de la carga es de par constante e igual al par nominal (par en la frecuencia base) en todo el rango de variación de la rotación, se sobredimensiona el par del motor según el derating calculado.

$$T = \frac{T_L}{T_r} = \frac{3,5}{0,6} = 5,83 \text{ kgfm}$$

Luego, la potencia nominal del motor será:

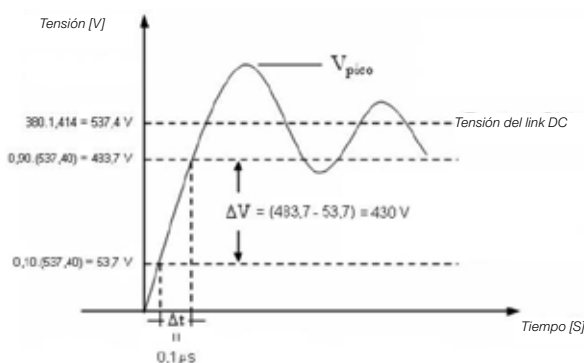
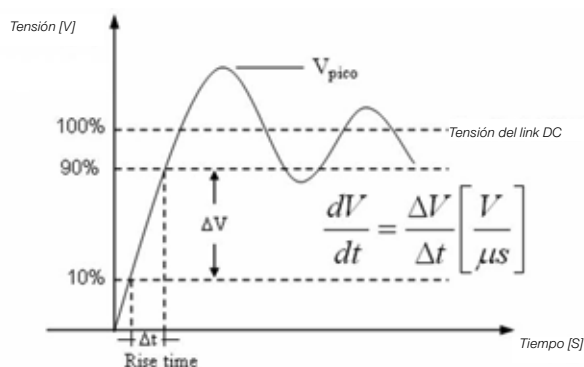
$$P = \frac{5,83 \cdot 1800}{716} = 14,66 \text{ cv}$$

Consultando el Catálogo General de Motores Trifásicos WEG para 1800 rpm y 60 Hz, el motor ideal para esta aplicación es de 15 cv - 4 polos - 60 Hz - carcasa IEC 132M. Una solución alternativa sería utilizar ventilación independiente. En este caso no habría la necesidad de sobredimensionamiento y un motor de 10 cv - 4 polos (carcasa IEC 132S) atendería satisfactoriamente a las exigencias de la aplicación. Con eso, garantizase que la elevación de temperatura del motor, para cualquier punto de operación de la carga, será menor o igual a 80 K.

8.1.2.2 Cuanto al sistema de aislamiento

Por el criterio NEMA se tiene la siguiente situación:

Tensión en los terminales del motor:



Motores con tensión nominal igual a 380 V soportan:

- dV/dt hasta 5200 V/ μs en los terminales del convertidor. Por tanto, satisfacen a las exigencias de la aplicación de este ejemplo.
- $tr \geq 0,1 \mu s$ en los terminales del convertidor. Por tanto, satisfacen a las exigencias de la aplicación de este ejemplo.
- $V_{pico} \leq 1430 \text{ V}$ en los terminales del motor. Si esta condición no es respetada después de la instalación del conjunto, deberán ser utilizados filtros en la salida del convertidor.

La frecuencia de conmutación de 5 kHz del ejemplo también está según recomendación de WEG. Por tanto, el motor proyectado atiende a las exigencias de la aplicación.

Por el criterio IEC, pero, no será posible evaluar la cuestión, una vez que requiere la medición de la tensión en los terminales del motor y, como el motor todavía está siendo dimensionado para la aplicación, se supone que la instalación no esté lista, impracticando, entonces, la realización de mediciones en la entrada del motor y el conocimiento de los valores de tensión de pico y rise time en sus terminales. Estos valores dependerán del tipo y del largo del cable utilizado en la instalación.

8.1.2.3 Cuanto a la protección para los cojinetes

De acuerdo con los criterios WEG de protección contra corrientes circulando en los cojinetes, la protección para los cojinetes de motores normales es opcional a partir de la carcasa 315 IEC. El motor seleccionado es de la carcasa 132 IEC y, de esta manera, no necesita sistema de aterramiento entre eje y carcasa y tampoco rodamientos aislados.

8.1.2.4 Cuanto al ruido

El ruido producido por el motor, cuando alimentado por convertidor, podrá aumentar en hasta 11 dB(A), considerando que será utilizado el modo escalar de control del convertidor.

8.2 Aplicación con bomba centrífuga – par cuadrático

8.2.1 Ejemplo

Dimensionar un motor de inducción de jaula WEG TEFC NEMA Premium Efficiency para operar con convertidor de frecuencia WEG del tipo PWM con control vectorial, accionando una bomba centrífuga de 10 cv y rotación máxima de 2700 rpm.

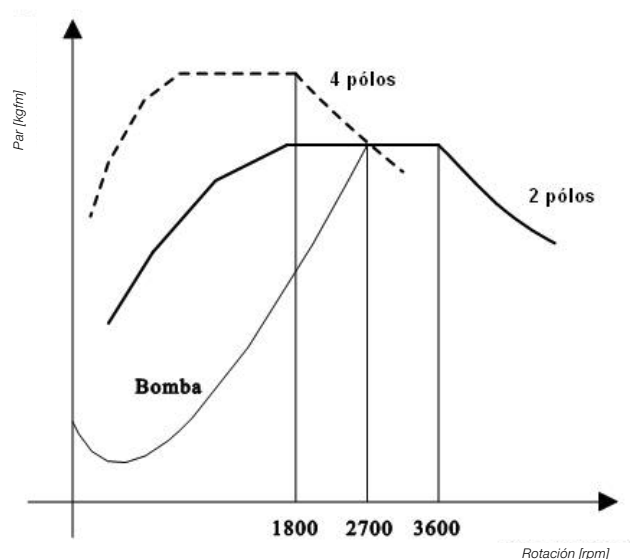
Datos generales:

- Red: 460 V / 60 Hz / Trifásica
- Ambiente: temperatura máxima 40°C; 1000 m altitud; atmósfera normal
- Convertidor CFW-09: $tr = 0,1 \mu s$; $f_{conm} = 2,5 \text{ kHz}$

8.2.2 Resolución

8.2.2.1 Cuanto a la elevación de temperatura (derating)

Las bombas se caracterizan por poseer un par que varía cuadráticamente con la rotación y, consecuentemente, una potencia que varía con el cubo de la rotación. En este caso, el dimensionamiento del motor debe ser realizado para la rotación máxima de operación de la bomba, pues en este punto es que ocurre la mayor exigencia de par para el motor. Según puede ser visto en la figura siguiente, hay dos alternativas de dimensionamiento: un motor 2 polos o un motor 4 polos. El motor de 2 polos operaría en la región de par constante, abajo de su rotación nominal. El motor de 4 polos, por otro lado, operaría en su región de enflaquecimiento de campo, esto es, arriba de su rotación nominal.



El par resistente de la bomba en la rotación máxima es dado por:

$$T_b = \frac{10.716}{2700} = 2,65 \text{ kgfm}$$

Motor 2 polos

$$2700 \text{ rpm} = 0.75 \text{ p.u.} \Rightarrow 45 \text{ Hz}$$

De acuerdo con los criterios de par para motores TEFC NEMA Premium Efficiency WEG (ítem 6.4.1.1), en aplicaciones con cargas de par variable, cualquier motor NPE está apto a la operación 1000:1, o sea, puede trabajar sin derating en todo el rango de operación. De esta forma, el factor de derating vale 1.0.

$$T_{2p} = \left(\frac{T_b}{df} \right) = 2,65 \text{ kgfm} = 25.99 \text{ Nm} = 19.17 \text{ lbft}$$

Consultando el WEG NEMA Motor Catalogue, el motor trifásico IP55 NEMA Premium Efficiency más adecuado es el de 15 hp (11 kW) – 2 polos – 60 Hz – carcasa NEMA 254 T.

Motor 4 polos

$$2700 \text{ rpm} = 1.50 \text{ p.u.} \Rightarrow 90 \text{ Hz}$$

De acuerdo con los criterios de par para motores TEFC NEMA Premium Efficiency WEG (ítem 6.4.1.1), en aplicaciones con cargas de par variable, cualquier motor NPE está apto a la operación con potencia constante desde 60 hasta 90 Hz. Para 90 Hz, el factor de derating de par vale entonces $(1.5)^{-1}$.

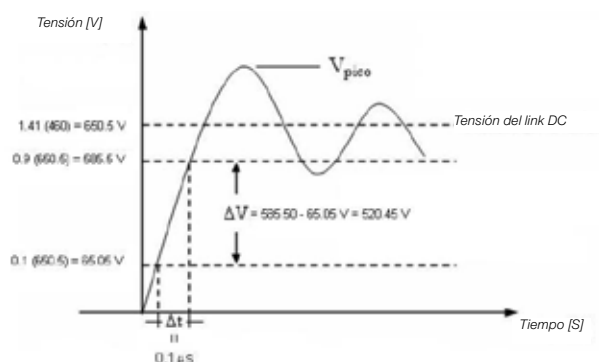
$$T_{4p} = \left(\frac{T_b}{df} \right) = \frac{2,65 \text{ kgfm}}{1.5} = 3.98 \text{ kgfm} = 39.06 \text{ Nm} = 28.79 \text{ lbft}$$

También por los criterios de par máximo WEG (ítem 6.4.3), verificase que el motor estará apto a atender a las exigencias de la operación. Consultando el WEG NEMA Motor Catalogue, el motor trifásico IP55 NEMA Premium Efficiency más adecuado es el de 10 hp (7.5 kW) – 4 polos – 60 Hz – carcasa NEMA 215 T.

Por tanto, evaluándose técnica y económicamente, el mejor motor para esta aplicación será el de 7.5 kW (10 hp) / 4 polos / 60 Hz / 460 V / Carcasa 215T.

8.2.2.2 Cuanto al sistema de aislamiento

Por el criterio NEMA se tiene la siguiente situación en los terminales del convertidor:



$$\frac{dV}{dt} = \frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{520.45 \text{ V}}{0.1 \mu\text{s}} \cong 5200 \text{ V}/\mu\text{s}$$

De acuerdo con los criterios de aislamiento WEG (ítem 6.6), los motores con tensión nominal igual a 460 V soportan:

- dV/dt hasta 5200 V/μs en los terminales del convertidor. Por tanto, satisfacen a las exigencias de aplicación de este ejemplo.
- $tr \geq 0.1 \mu\text{s}$ en los terminales del convertidor. Por esta razón, satisfacen a las exigencias de la aplicación de este ejemplo.
- $V_{pico} \leq 1430 \text{ V}$ en los terminales del motor. Si esta condición no es respetada después de la instalación del conjunto, deberán ser utilizados filtros en la salida del convertidor.

La frecuencia de conmutación recomendada por WEG es de hasta 5 kHz. Por tanto, atiende a la necesidad de esta aplicación. Siendo así, en relación al sistema de aislamiento, el motor elegido atiende a las exigencias de la aplicación.

Por el criterio IEC, pero, no será posible evaluar la cuestión, una vez que requiere la medición de la tensión en los terminales del motor y, como el motor todavía está siendo dimensionado para la aplicación, se supone que la instalación no esté lista, impracticando, de esta manera, la realización de mediciones en la entrada del motor y el conocimiento de los valores de tensión de pico y rise time en los sus terminales. Esos valores dependerán del tipo y del largo del cable utilizado en la instalación.

8.2.2.3 Cuanto a la protección para los cojinetes

De acuerdo con los criterios WEG de protección contra corrientes circulando en los cojinetes, la protección para los cojinetes de motores normales es opcional a partir de la carcasa 504 NEMA. El motor seleccionado es de la carcasa 215 NEMA y, de esta manera, no necesita sistema de aterramiento entre eje y carcasa y tampoco rodamientos aislados.

8.3 Aplicación especial – cable largo

8.3.1 Ejemplo

Evaluar los picos de tensión en los terminales de un motor especial WEG, con los siguientes datos de placa: 9 kW – 2115 rpm – 500 V – 72 Hz. Por cuestiones intrínsecas a la aplicación, el motor necesita ser alimentado por un convertidor PWM a través de un cable con 100 metros de largo.

8.3.2 Resolución

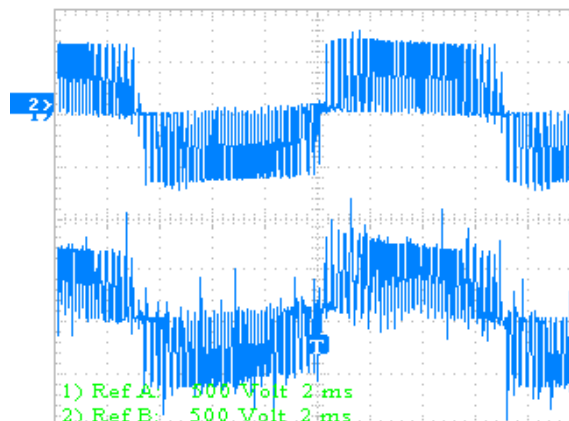
Suponiendo que los criterios de elevación de temperatura, protección para los cojinetes y ruido ya tengan sido verificados y sean atendidos por el motor diseñado, se hace suficiente verificar si el aislamiento del mismo soportará las condiciones de la aplicación. En función del gran largo del cable, hay la posibilidad de que ocurran picos de tensión (overshoots) excesivos en los terminales del motor y por eso especial atención debe ser dada a la cuestión del aislamiento. Para evaluar la cuestión, débese considerar la más elevada rotación del motor adentro del rango de frecuencias de operación, para que los niveles de tensión llegando a sus terminales sean máximos y así los pulsos de tensión producidos también sean los mayores posibles.

De acuerdo con los criterios de aislamiento de los motores WEG (ítem 6.6), para alimentación 500 V, los motores deben soportar picos de hasta 1780 V en sus terminales y un $dV/dt \leq 6500 \text{ V}/\mu\text{s}$.

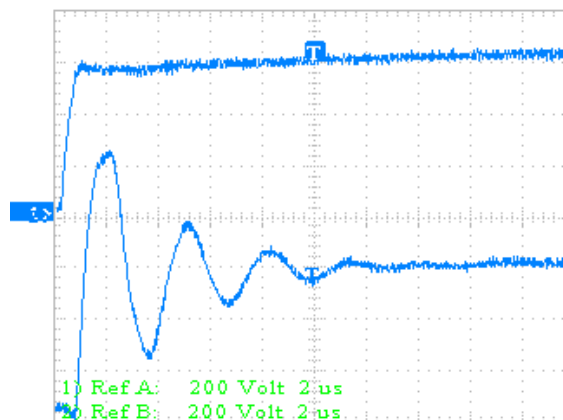
En este caso es posible analizar los picos de tensión en los terminales del motor, según requiere el criterio IEC, pues la instalación ya existe, o sea, los factores determinantes de la incidencia y de la gravedad de los overshoots están definidos.

A seguido están las formas de ola medidas en los terminales de salida del convertidor (curvas superiores – señal PWM antes del cable) y en la entrada del motor (curvas inferiores – señal PWM después del cable). Es importante resaltar, que las formas de ola en los terminales del motor serían otras si otro cable sea utilizado. Fueron utilizados cables no-blindados con 4 conductores (3 fases + tierra) asimétricamente distribuidos.

El convertidor fue alimentado con señal senoidal de 500 V / 50 Hz y posee control escalar y frecuencia de conmutación 4 kHz.

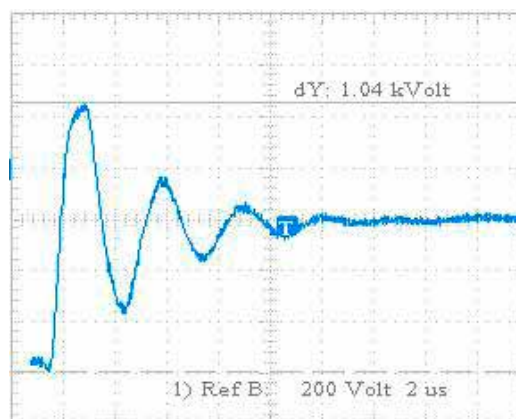


- curva superior: tensión que sale del convertidor
- curva inferior: tensión que llega al motor



Zoom en un pulso de tensión de la señal mostrado al lado, para análisis de t_r y V_{pico} .

Intensidad del pico en los terminales del motor



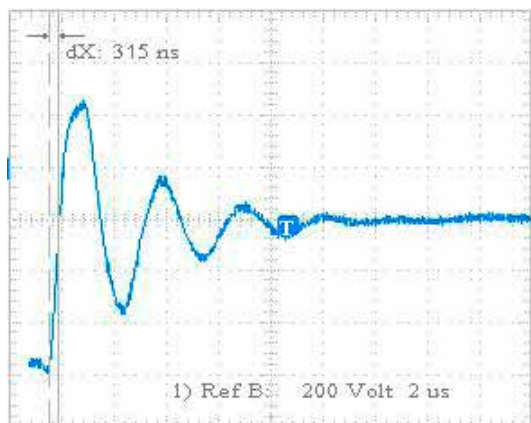
$$V_{pico} \cong 1040 \text{ V}$$

Criterio WEG $\Rightarrow 1780 \text{ V} (>1040 \text{ V}) \Rightarrow \text{Ok!}$

Criterio NEMA $\Rightarrow 3,1500 = 1550 \text{ V} (< 1780 \text{ V}) \Rightarrow \text{Ok!}$

Criterio IEC $\Rightarrow \cong 1300 \text{ V} (< 1780 \text{ V}) \Rightarrow \text{Ok!}$

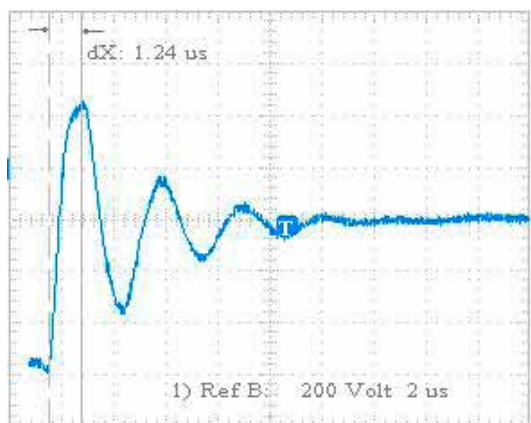
Rise time



$$t_r \approx 0,8 \cdot 0,315 = 0,25 \mu s = \Delta t$$

Criterio WEG $\Rightarrow 0,1 \mu s$ (mínimo) en los terminales del convertidor $\Rightarrow$ Ok!

Criterio NEMA $\Rightarrow 0,1 \mu s$ (mínimo) en los terminales del convertidor $\Rightarrow$ Ok!



$$t_r \approx 0,8 \cdot 1,24 = 0,99 \mu s = \Delta t$$

Criterio IEC $\Rightarrow t_r$ en los terminales del motor (no establece valor mínimo)

dV/dt

Terminales convertidor:

$$\Delta V = 0,8 \cdot V_{\text{link DC}} = 0,8 (500 \cdot 1,414) = 565,6 \text{ V}$$

$$\Delta t = 0,25 \mu s$$

$$dV/dt \approx \Delta V / \Delta t = 2262,7 \text{ V}/\mu s$$

Terminales motor:

$$\Delta V = 0,8 \cdot V_{\text{pico}} = 0,8 \cdot 1040 = 832 \text{ V}$$

$$\Delta t = 0,99 \mu s$$

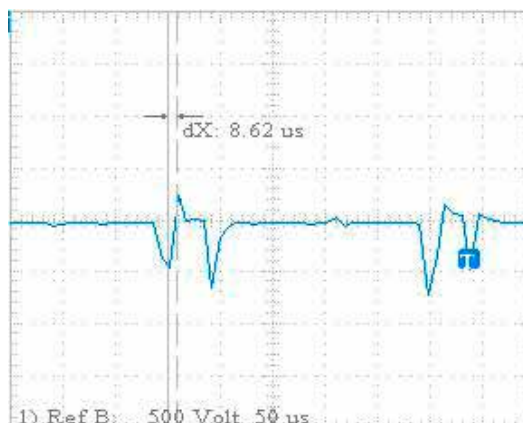
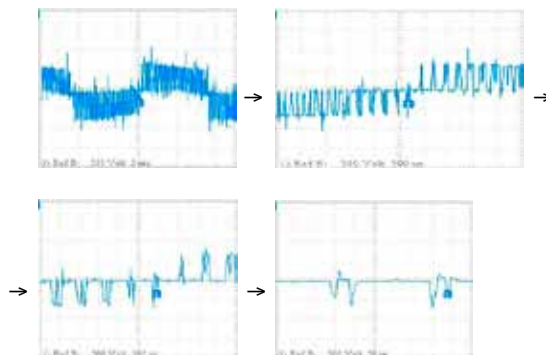
$$dV/dt \approx \Delta V / \Delta t = 840,4 \text{ V}/\mu s$$

Criterio WEG $\Rightarrow 6500 \text{ V}/\mu s (> 2262,7 \text{ V}/\mu s) \Rightarrow$ Ok!

Criterio NEMA $\Rightarrow 6500 \text{ V}/\mu s \Rightarrow$ Ok!

Criterio IEC $\Rightarrow 840,4 \text{ V}/\mu s (< 6500 \text{ V}/\mu s) \Rightarrow$ Ok!

Mínimo tiempo entre pulsos



$$MTBP \approx 8,6 \mu s$$

(la forma de ola al lado es exactamente la misma de las demás figuras de este ejemplo, pero, con un zoom conveniente para la observación en el mínimo tiempo entre pulsos consecutivos).

Criterio WEG = $6 \mu s$ (mínimo) $\Rightarrow$ Ok!

Por tanto, en este ejemplo, todos los criterios de aislamiento WEG son atendidos y la utilización de filtros no se hace necesaria. Pero, estas conclusiones valen estrictamente para el conjunto (convertidor + motor + cable) investigado. Según mencionado anteriormente, la utilización de otro cable u otro convertidor alteraría los picos de tensión en los terminales del motor.

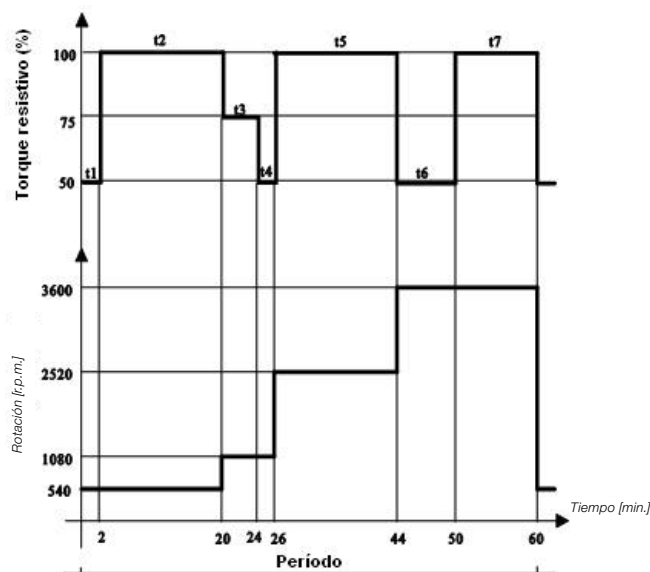
8.4 Aplicación para la industria textil (par variable / velocidad variable)

8.4.1 Ejemplo

Dimensionar el motor de inducción de jaula normal WEG autoventilado, accionado por cualquier convertidor de frecuencia WEG del tipo PWM para uso en la industria textil, según las informaciones a seguido: Par resistivo de 5 kgfm en plena carga; rango de operación desde 540 rpm a 3600 rpm; acoplamiento directo; ciclo de operación según abajo. Se desea elevación de temperatura de la clase B (80 K) en los devanados.

Datos generales:

- Red: 380 V / 60 Hz / Trifásica
- Ambiente: temperatura máxima 40 °C, altitud 1000 m, atmosfera normal



8.4.2 Resolución

Considerando que el rango de variación de la rotación es de 540 rpm a 3600 rpm y que la frecuencia base de operación es de 60 Hz, entonces el motor elegido debe poseer 2 polos, pues polaridades mayores conducirían a frecuencias elevadas de operación y a problemas crecientes de pérdida de par a partir de 60 Hz.

En la frecuencia base, la potencia demandada por la carga desconsiderando el deslizamiento, será:

$$P_{(cv)} = \frac{Tr (kgfm) \cdot n (rpm)}{716} = \frac{5.3600}{716} = 25,14 \text{ cv}$$

De acuerdo con los criterios WEG de reducción de par para motores normales en la condición de flujo constante – V/f constante (ítem 6.4.1.2) en 60 Hz (1 p.u.) el par debe ser reducido para 0,95 p.u. para mantener la temperatura del motor adentro de los límites de la clase B. Como no es posible, todavía, reducir el par nominal de la carga en 5%, pues ella exige par constante, y no se desea usar ventilación independiente, optase por el sobredimensionamiento del motor. Así, la potencia nominal del motor deberá ser 5% mayor que la considerada inicialmente:

$$P = \frac{25,14}{0,95} = 26,46 \text{ cv}$$

Consultando el Catálogo General de Motores Eléctricos WEG, el motor que mejor se aplica a la situación posee 30 cv y 2 polos. Si el régimen de operación de la máquina accionada fuera continuo, con carga nominal y sin variación de rotación, el dimensionamiento estaría bien hecho y concluido aquí. El ciclo de operación efectivo, sin embargo, envuelve distintos porcentuales de carga y variación de rotación. De esta forma, para un dimensionamiento térmico adecuado, débese analizar la demanda de la carga en cada

condición de operación y, posteriormente, calcular el par equivalente del motor para todo el ciclo de operación. Una vez obtenido el par equivalente, débese asegurar que el motor seleccionado será capaz de suministrar la máxima potencia solicitada en el régimen. Asumiéndose que la elevación de temperatura sea directamente proporcional a las pérdidas y que las pérdidas Joule sean preponderantes, entonces las pérdidas varían con el cuadrado de la corriente y vale la ecuación abajo:

$$T_{eq} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^7 \left(\frac{T_i}{df_i} \right)^2 t_{if}}{\sum_{i=1}^7 t_i}}$$

donde,

T_{eq} : par equivalente del motor

T_i : par exigido por la carga en cada rotación del ciclo de operación

df_i : factores de derating a ser aplicados en cada rotación del ciclo de operación, considerando el incremento en la elevación de temperatura del motor debido a las armónicas y la reducción en la ventilación;

t_i : periodo o tiempo de operación en cada trecho del ciclo, considerado como abajo.

$$t_i = t_{if} + t_{ip}/k_v$$

t_{if} : intervalos de tiempo en que el motor está operando (con carga o en vacío)

t_{ip} : suma de los intervalos de tiempo en que el motor está parado

k_v : constante que depende del resfriamiento do motor.

Cuando la ventilación independe de la operación del motor (por ejemplo, motores TENV), entonces $k_v=1$. Cuando la ventilación está vinculada a la operación del motor (por ejemplo, motores TEFC), entonces $k_v=3$.

Por tanto, es necesario calcular el factor de derating (df) para cada trecho del ciclo de operación:

Trecho (i)	1	2	3	4	5	6	7
Periodo [min]	2	18	4	2	18	6	10
Par p.u.	0,50	1,00	0,75	0,50	1,00	0,50	1,00
Par [kgfm]	2,50	5,00	3,75	2,50	5,00	2,50	5,00
Rotación [rpm]	540	540	1080	1080	2520	3600	3600
Frecuencia [Hz]	9	9	18	18	42	60	60
Frecuencia p.u.	0,15	0,15	0,30	0,30	0,70	1,00	1,00
Fator Derating* (df)	0,65	0,65	0,77	0,77	0,91	0,95	0,95

* Conforme los criterios WEG de reducción de par para motores normales en la condición de flujo constante (ítem 6.4.1.2)

Así,

$$T_{eq} = \sqrt{\frac{\left(\frac{T_{50\%}}{0,65}\right)^2 \cdot 2 + \left(\frac{T_{100\%}}{0,65}\right)^2 \cdot 18 + \left(\frac{T_{75\%}}{0,77}\right)^2 \cdot 4 + \left(\frac{T_{50\%}}{0,77}\right)^2 \cdot 2 + \left(\frac{T_{100\%}}{0,91}\right)^2 \cdot 18 + \left(\frac{T_{50\%}}{0,95}\right)^2 \cdot 6 + \left(\frac{T_{100\%}}{0,95}\right)^2 \cdot 10}{(2+18+4+2+18+6+10)}}$$

$$T_{eq} = \sqrt{\frac{\left(\frac{2,50}{0,65}\right)^2 \cdot 2 + \left(\frac{5,00}{0,65}\right)^2 \cdot 18 + \left(\frac{3,75}{0,77}\right)^2 \cdot 4 + \left(\frac{2,50}{0,77}\right)^2 \cdot 2 + \left(\frac{5,00}{0,91}\right)^2 \cdot 18 + \left(\frac{2,50}{0,95}\right)^2 \cdot 6 + \left(\frac{5,00}{0,95}\right)^2 \cdot 10}{(2+18+4+2+18+6+10)}}$$

$$T_{eq} = \sqrt{\frac{(3,85)^2 \cdot 2 + (7,69)^2 \cdot 18 + (4,87)^2 \cdot 4 + (3,25)^2 \cdot 2 + (5,49)^2 \cdot 18 + (2,63)^2 \cdot 6 + (5,26)^2 \cdot 10}{(2+18+4+2+18+6+10)}} = \sqrt{\frac{2072,60}{60}} = 5,88 \text{ kgfm}$$

Luego, la potencia exigida por la carga será:

$$P = \frac{5,88 \times 3600}{716} = 29,60 \text{ cv}$$

Consultando el catálogo de motores trifásicos WEG para 3600 rpm y 60 Hz, el motor ideal para esta aplicación es de 30 cv, 2 polos, 60 Hz, carcasa 160L.

8.5 Ejemplo considerando la utilización de la Solución Flujo Óptimo WEG

8.5.1 Ejemplo

Para la misma aplicación del ejemplo anterior, dimensionar un motor de inducción de jaula autoventilado WEG de alta eficiencia, accionado por un convertidor de frecuencia WEG CFW-09 versión 2.40 o posterior. Considerar que la elevación de temperatura deseada en las bobinas sea 105 K.

8.5.2 Resolución

Observando la línea del motor (Alta Eficiencia Plus) y las características del convertidor (CFW-09 versión 2.40 o posterior), verificase que en este caso será posible utilizar la solución flujo óptimo. Este ejemplo pretende evidenciar las ventajas proporcionadas por la utilización de la Solución Flujo Óptimo.

Se hace necesario calcular nuevamente el factor de derating (df) para cada trecho del ciclo de operación, pero de esta vez de acuerdo con los criterios WEG de reducción de par para motores Alta Eficiencia Plus en la condición de flujo óptimo (ítem 6.4.1.2), considerando la elevación de temperatura de la clase F.

Trecho (i)	1	2	3	4	5	6	7
Periodo [min]	2	18	4	2	18	6	10
Par p.u.	0,50	1,00	0,75	0,50	1,00	0,50	1,00
Par [kgfm]	2,50	5,00	3,75	2,50	5,00	2,50	5,00
Rotación [rpm]	540	540	1080	1080	2520	3600	3600
Frecuencia [Hz]	9	9	18	18	42	60	60
Frecuencia p.u.	0,15	0,15	0,30	0,30	0,70	1,00	1,00
Fator Derating* (df)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

* Conforme los criterios WEG de reducción de par para motores normales en la condición de flujo constante (ítem 6.4.1.2)

Así,

$$T_{eq} = \sqrt{\frac{\left(\frac{T_{50\%}}{1,00}\right)^2 \cdot 2 + \left(\frac{T_{100\%}}{1,00}\right)^2 \cdot 18 + \left(\frac{T_{75\%}}{1,00}\right)^2 \cdot 4 + \left(\frac{T_{50\%}}{1,00}\right)^2 \cdot 2 + \left(\frac{T_{100\%}}{1,00}\right)^2 \cdot 18 + \left(\frac{T_{50\%}}{1,00}\right)^2 \cdot 6 + \left(\frac{T_{100\%}}{1,00}\right)^2 \cdot 10}{(2+18+4+2+18+6+10)}}$$

$$T_{eq} = \sqrt{\frac{(2,50)^2 \cdot 2 + (5,00)^2 \cdot 18 + (3,75)^2 \cdot 4 + (2,50)^2 \cdot 2 + (5,00)^2 \cdot 18 + (2,50)^2 \cdot 6 + (5,00)^2 \cdot 10}{(2+18+4+2+18+6+10)}} = \sqrt{\frac{1268,75}{60}} = 4,60 \text{ kgfm}$$

Luego, la potencia exigida por la carga será:

$$P = \frac{4,60 \times 3600}{716} = 23,12 \text{ cv}$$

Consultando el catálogo de motores trifásicos WEG para 3600 rpm y 60 Hz, el motor ideal para esta aplicación es de 25 cv, 2 polos, 60 Hz, carcasa 160M. Se verifica de esta manera, que en este ejemplo la Solución Flujo Óptimo ofrece una mejor utilización de la energía, permitiendo que un motor de carcasa menor atienda a la aplicación, sin el uso de ventilación forzada o sobredimensionamiento.

9 Recomendaciones para la realización de mediciones de formas de ola del tipo PWM

9.1 Advertencia

Las mediciones de las cuales tratan este capítulo envuelven niveles potencialmente letales de tensión y corriente eléctrica. Solamente personas calificadas, familiarizadas con la construcción y operación de los equipamientos y riesgos envueltos deben realizar tales mediciones.

9.2 Instrumentación

Según ya mencionado, convertidores de frecuencia suministran a los motores formas de olas moduladas por ancho de pulso, las cuales no son senoidales. Las mediciones de tales formas de ola requieren instrumentos especiales, apropiados a esta condición, para que puedan ser confiables. Modernos instrumentos digitales de medición, que sean aptos a leer valores eficaces verdaderos (true rms) deben ser usados. Algunos de ellos, sin embargo, no logran medir la componente fundamental de las formas de ola PWM. Instrumentos de medición de armónicas con tasas de exhibición suficientemente elevadas son capaces de medir tanto el valor eficaz cuanto el valor fundamental de las tensiones y corrientes PWM. En la mayoría de los casos es conveniente usar un osciloscopio con punteras de pruebas aisladas y ancho de banda adecuada.

9.3 Medición de parámetros

De acuerdo con el NEMA Application Guide for AC ASD Systems, la instrumentación recomendada para la medición de los diversos parámetros de interés debe atender los requisitos presentados en la tabla a seguido.

Instrumentación recomendada para la medición de formas de ola en ambiente PWM

Parámetro	Medición típica	Instrumentación requerida
Tensão entrada inversor	Fundamental	Voltímetro analógico o digital
	Transientes	Osciloscopio con capacidad para 20 MHz o más
Tensión salida convertidor (entrada motor)	Fundamental	Instrumento capaz de medir la fundamental de una forma de ola no senoidal
	Transientes de pico y dV/dt	Osciloscopio con tasa de exhibición mayor o igual a 1Ms/s
Corriente entrada convertidor	Valor eficaz verdadero	Instrumento capaz de medir valores true rms
Corriente salida convertidor (entrada motor)	Valor eficaz verdadero	Instrumento capaz de medir valores true rms
	Fundamental	Instrumento capaz de medir la fundamental de una forma de ola no senoidal
Harmónicas tensión entrada	Fundamental + Harmónicas	Analizador de espectro
Harmónicas corriente entrada	Fundamental + Harmónicas	Analizador de espectro

9.4 Consideraciones en relación al aterramiento

El aterramiento del sistema de potencia es una cuestión crítica, que debe ser observada con atención. Para que las mediciones puedan ser seguras, confiables y libres de interferencia es necesario que haya un buen sistema de aterramiento. Las recomendaciones de los fabricantes, bien como regulaciones locales concernientes al sistema de aterramiento deben ser siempre seguidas en el proyecto e instalación de la malla de aterramiento.

9.4.1 Aterramiento de convertidor

El convertidor de frecuencia debe ser solidamente aterrado al hilo tierra del sistema de distribución principal. El conductor tierra del control no debe ser compartido con equipamiento eléctrico de soldadura u otro(s) equipamiento(s) eléctrico(s) de alta corriente (5x la corriente nominal del control). Si alguna de estas condiciones existe, se debe usar un transformador aislador dimensionado para el control instalado y con el neutro del secundario conectado en estrella solidamente aterrado.

Cuando haya más de un convertidor, cada uno de ellos debe ser aterrado directamente al terminal tierra del sistema – ellos no deben ser aterrados en malla o en serie.

9.4.2 Aterramiento del motor

El conductor tierra de salida puede pasar por el mismo conducto de los cables del motor. Pero este hilo debe operar como aterramiento para el motor y no como el cuarto hilo conductor de corriente en un circuito de alimentación de motor tipo estrella a cuatro hilos. El electroconductor metálico aterrado que lleva los cables de alimentación puede proveer blindaje electromagnética, pero no suministra un aterramiento adecuado para el motor; un conductor tierra separado debe ser usado para esta finalidad. El hilo tierra del motor no debe ser conectado al conducto metálico.

9.5 Procedimientos de medición

Condiciones reales de operación (especialmente en lo que se refiere a la rotación, tipo de control y frecuencia de conmutación) deben ser atendidas en el momento de la realización de las mediciones. Débese llevar en cuenta que rotaciones más elevadas implican niveles más elevados de tensión y, por tanto, la operación en la rotación más alta del rango de operación probablemente provocará los mayores picos de tensión posibles en los terminales de motor.

9.5.1 Visualización de la forma de ola

The correct evaluation of a VSD System strongly depends on a proper analysis of the waveforms measured. The visualization of one cycle (or specific parts of a cycle) of the PWM voltage waveform at the motor terminals gives an idea about the pulses' quality at the motor terminals. For a better verification of the consistency of these pulses, the visualization of two or three cycles is recommended, once it evidences the repetitiveness of such pulses. A detailed analysis of a single pulse finally allows that conclusions about the rise time and the intensity of the peak voltages be found.

9.5.2 Ajuste del fondo de escala del osciloscopio

La mejor selección de fondo de escala a ser adoptado durante las mediciones depende lógicamente del orden de magnitud de las grandezas eléctricas a medirse. No obstante, los rangos presentados en la tabla abajo son usualmente adecuados para mediciones en 50 o 60 Hz y pueden servir como orientación inicial.

Sugestiones de selección y ajuste de escala del osciloscopio

Visualización	Eje "X"	Eje "Y"
1 ciclo	1 $\leftrightarrow$ 2 ms / div	100 $\leftrightarrow$ 500 V / div
3 ciclo	5 $\leftrightarrow$ 10 ms / div	100 $\leftrightarrow$ 500 V / div
1 pulso	0.1 $\leftrightarrow$ 10 μ s / div	100 $\leftrightarrow$ 500 V / div

9.5.3 Trigger

Osciloscopios son instrumentos normalmente empleados para la medición y no para el monitoreo de grandezas eléctricas. Pero, el trigger de algunos osciloscopios modernos puede ser convenientemente ajustado para almacenar datos de interés particular, por ejemplo formas de ola de picos de tensión capturadas durante regímenes transientes, tales como los periodos de aceleración y desaceleración. Más informaciones sobre esta posibilidad pueden ser ubicadas en el Manual del Usuario del instrumento de medición.

10 Conclusión

El rápido avance de la electrónica de potencia ha permitido que motores de inducción, tradicional solución para accionamientos de velocidad continua, sean utilizados con suceso también en aplicaciones que requieran variación de velocidad.

Pero, en estos casos, el motor no debe ser alimentado directamente por la red (senoidal), sino por medio de un convertidor estático de frecuencia.

La utilización de motores de inducción con convertidores electrónicos presenta grandes ventajas tanto energéticas cuanto económicas, cuando comparada con otras soluciones existentes para aplicaciones industriales de velocidad variable. Sin embargo, el uso del convertidor trae consecuencias, para las cuales los fabricantes de motores necesitan estar atentos.

Así siendo, el creciente número de aplicaciones con motores de inducción operando en régimen de velocidad variable - accionados por convertidores PWM - exige el buen entendimiento del sistema de potencia como un todo y de las interacciones que ocurren entre las partes que lo constituyen (red – convertidor – motor – carga).

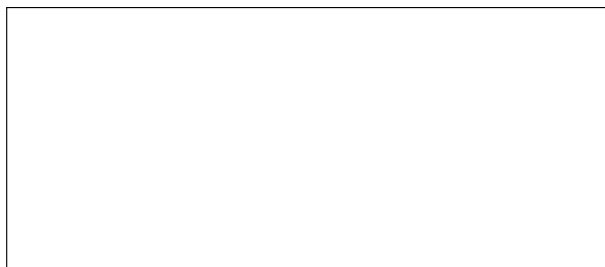
Este Guía Técnico abordó los principales aspectos envueltos con la aplicación de motores de inducción de jaula en conjunto con convertidores estáticos de frecuencia, presentando fundamentos teóricos y criterios prácticos para tópicos específicos, provenientes de estudios y de la experiencia del equipo técnico de WEG sobre el tema. Los principales documentos técnicos internacionales relacionados con tales aplicaciones también son citados y discutidos. Debe ser resaltado que los criterios aquí presentados no son permanentes. Ellos cambian a la medida que nuevos materiales son desarrollados y nuevas experiencias son ejecutadas, como cualquier tecnología. De esta manera, pueden acontecer alteraciones en los criterios de aplicación sin previo aviso y por eso es importante que este documento sea periódicamente revisado e actualizado.

11 Bibliografia

- *NEMA MG1 Part 30 - Application considerations for constant speed motors used on a sinusoidal bus with harmonic content and general purpose motors used with adjustable-frequency controls or both (2006)*
- *NEMA MG1 Part 31 - Definite-purpose inverter-fed polyphase motor (2006)*
- *NEMA - Application Guide for AC Adjustable Speed Drive Systems (2001)*
- *IEC 60034-17 - Cage induction motors when fed from converters – application guide (2006)*
- *IEC 60034-25 - Guide for the design and performance of cage induction motors specifically designed for converter supply (2007)*
- *GAMBICA/REMA Technical Guides for Variable Speed Drives and Motors*
- *GAMBICA/REMA Technical Reports for Variable Speed Drives and Motors*
- Apostila do mini-curso Motores de Indução de Gaiola Alimentados por Inversores de Frequência – Departamento de Pesquisa e Desenvolvimento do Produto – WEG Equipamentos Elétricos S.A. – Motores
- Trabalhos de Tecnologia WEG concernentes ao assunto (TT 2000-002, TT 2003-011)
- Catálogo Geral de Motores Elétricos WEG
- Manual do Inversor de Frequência CFW-09
- Relatórios Técnicos do Departamento de Pesquisa e Desenvolvimento do Produto – WEG Equipamentos Elétricos S.A. – Motores
- Notas Técnicas do Departamento de Desenvolvimento de Produtos – WEG Equipamentos Elétricos S.A. – Automação
- Minimização de Perdas em Motores de Indução Alimentados por Inversores de Frequência – Solução Fluxo Ótimo – Waldiberto L. Pires e Hugo G. G. Mello – PCIC BR 2006
- *Low-Voltage PWM Inverter-Fed Motor Insulation Issues – Michael J. Melfi – IEEE Transactions on Industry Applications, vol.42*



WEG Equipamentos Elétricos S.A.
Jaraguá do Sul - SC
Fone (47) 3276-4000 - Fax (47) 3276-4020
São Paulo - SP
Fone (11) 5053-2300 - Fax (11) 5052-4212
motores@weg.net
www.weg.net



27.00/12009 - Sujeito a alterações sem aviso prévio.
As informações contidas são valores de referência.