

MOTORES ALIMENTADOS POR INVERSORES DE FREQUÊNCIA: O ISOLAMENTO RESISTE?

Mario Célio Contin – marioc@weg.com.br
Depto.Pesquisa e Desenvolvimento (P&D)
WEG Motores Ltda

RESUMO

Com o uso cada vez mais difundido de inversores de frequência nas aplicações com variação de velocidade, uma nova preocupação surge para os fabricantes e usuários de motores elétricos: o isolamento resiste? De fato, os altos e freqüentes picos de tensão provocados pelo inversor podem levar à ruptura do dielétrico isolante, requerendo o uso de melhores sistemas de isolamento e materiais mais resistentes à degradação. Os fenômenos físicos envolvidos, bem como toda a problemática deste assunto, estão apresentados neste trabalho.

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos tem sido verificado o que parece ser uma tendência irreversível, em vista das vantagens oferecidas, o acionamento de máquinas com controle de velocidade através do uso de motores de indução de gaiola, alimentados por inversores de frequência (retificador + inversor). Este sistema tem adquirido muita força em função da rápida evolução tecnológica e redução de custos das fontes eletrônicas chaveadas do tipo PWM (Modulação por Largura de Pulso). Mas, em função desta evolução, a qual permitiu um aumento considerável no rendimento dos motores, em virtude das melhorias obtidas na forma de onda modulada de saída destes inversores, criou-se um problema adicional, relativo ao sistema de isolamento dos motores. Com o aumento da velocidade de chaveamento e frequência de pulsação dos inversores melhorou-se o espectro da onda modulada de saída, reduzindo o conteúdo de harmônicos e incrementando com isto o rendimento dos motores. Porém com o chaveamento mais rápido que com o uso de semicondutores do tipo IGBT já atinge tempos para comutação de tensão da ordem de 0.1µs e até menores, originou-se uma nova questão vital causada pelos altos gradientes de potencial desenvolvidos nos enrolamentos [1].

Então devido a isto, o que pode ser classificado como um “mal necessário”, em virtude da urgência da rápida evolução tecnológica que o mundo moderno precisa e exige, ficou o problema relativo ao sistema de isolamento, onde em alguns casos, para preservar a vida útil dos motores, pode ser necessário o uso de sistemas isolantes mais complexos e caros ao invés dos convencionais praticados até então. Esta tem sido a partir daí, para fazer frente às necessidades

tecnológicas surgidas, uma das principais preocupações dos grandes fabricantes de motores. Para a busca da solução para este problema, é necessário um grande investimento, abrangendo desde o entendimento físico mais completo dos fenômenos envolvidos, até a concepção de materiais, métodos, técnicas de medição e processos que permitam resolvê-lo, respeitando os princípios técnico-econômicos.

2. CAUSAS PRINCIPAIS QUE PODEM LEVAR O ISOLAMENTO À RUPTURA

O sistema de isolamento de um motor de indução, quando alimentado por inversor de frequência, fica submetido a uma multiplicidade de fatores adversos que podem levar à ruptura de sua integridade dielétrica, ou seja, podem provocar o rompimento do dielétrico isolante, levando a máquina à falha prematura. A degradação do sistema isolante pode ocorrer devido a causas térmicas, elétricas ou mecânicas, ou por uma combinação de todos estes fatores.

Atualmente, com o uso generalizado de motores acionados por inversores de frequência, o foco do problema tem se voltado sobretudo para a suportabilidade do isolante dos fios, trazendo a tona importantes questões sobre cuidados e melhorias necessárias, visto que estes ficam submetidos a altos picos de tensão, provocados pela rapidez do crescimento dos pulsos gerados pelo inversor (rise time), bem como pela alta frequência com que estes picos são produzidos. Com isto, atenção especial deve ser dada ao “**rise time**” e à “**frequência de pulsação**” dos inversores de frequência. A fig.1 apresenta as formas de onda da tensão sobre o conjunto motor-inversor.

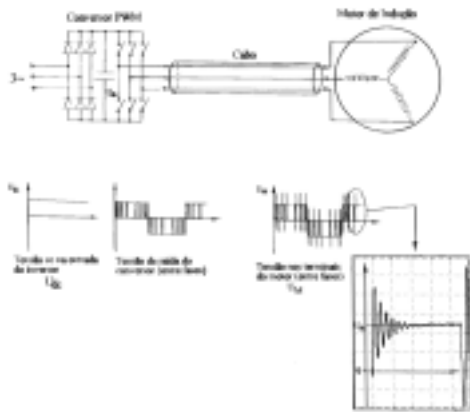


Fig.1 Esquema básico de acionamento de motor de indução através de inversor PWM, com respectiva seqüência característica de tensões elétricas.

3. INFLUÊNCIA DO RISE-TIME (dV/dt)

Devido à rapidez do crescimento do pulso de tensão (dV/dt) emitido pelo conversor ao motor, a(s) primeira(s) espira(s) da primeira bobina de uma dada fase fica(m) submetida(s) a um alto valor de tensão. Com isto o “**rise time**” tem influência direta no tempo de vida útil do sistema isolante, ou seja, quanto menor o tempo de crescimento do pulso (*rise time* menor) maior será o nível de tensão originado entre espiras (primeiras espiras) e conseqüentemente mais rápida a degradação do sistema de isolamento do motor.

Os fenômenos que interagem são semelhantes aos que ocorrem com os chamados impulsos elétricos, onde um pulso enviado pelo inversor penetra no enrolamento do motor. A frente de onda deste pulso tem uma importância vital, pois sua taxa de crescimento (dV/dt) determina o valor da d.d.p. (diferença de potencial) nas primeiras espiras por onde irá passar. O circuito elétrico equivalente, por onde esta onda penetra, é constituído de indutâncias e capacitâncias distribuídas, formadas por trechos respectivamente do enrolamento e sistema isolante do motor. Esta rapidez no crescimento da frente de onda se deve à grande velocidade de operação dos dispositivos de chaveamento dos inversores (Tiristores SCR, Tiristores GTO, Transistores IGBT), os quais estão se tomando cada vez mais rápidos.

Com tudo isto, em função do “**rise time**”, mostrado na fig.2, o sistema de isolamento fica submetido a altos gradientes de potencial elétrico, exigindo dos isolantes características dielétricas superiores.

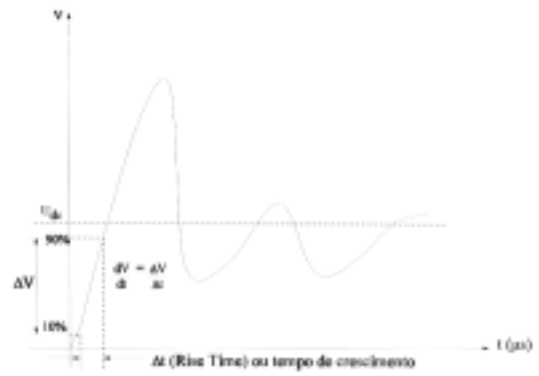


Fig.2 Tempo de crescimento dos pulsos (rise time)

4. PARÂMETROS E GRANDEZAS EQUIVALENTES

Os pulsos repetitivos (trem de pulsos) mesmo sendo cada um individualmente de curta duração, causam um efeito cumulativo, o qual dependendo do projeto do sistema de isolamento do motor pode abreviar substancialmente a vida útil deste. Tendo em vista a significância do assunto, particularmente porque ele afeta a vida útil do isolamento, há a necessidade de um estudo dirigido para as relações entre indutâncias distribuídas, capacitâncias distribuídas, impedâncias características, e assim por diante, tudo enfim que é importante para o entendimento das tensões impulsivas originadas [5].

O enrolamento estatórico por fase é uma estrutura iterativa, isto é, há uma repetição de elementos similares ao longo de seu comprimento. O enrolamento é então composto de indutores distribuídos formando reatâncias em série ao longo do comprimento e capacitâncias distribuídas contra a massa (terra) e entre espiras, formando reatâncias em paralelo. Adicionalmente existem ainda as resistências elétricas próprias dos enrolamentos distribuídas em série, bem como as resistências elétricas do sistema isolante distribuídas em paralelo. Além disso, há as reatâncias mútuas entre as bobinas componentes deste enrolamento por fase, bem como entre fases do enrolamento. Um circuito equivalente por fase poderá ser conforme o mostrado na fig.3.

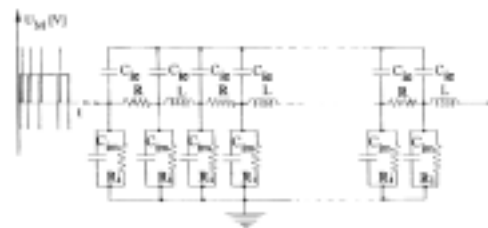


Fig.3 Circuito equivalente para propagação dos pulsos no motor

onde

- L= Indutância de surto, por unidade de comprimento, [H/m]
 R= Resistência elétrica própria do enrolamento por unidade de comprimento, [Ω/m]
 Cim= Capacitância de surto contra a massa, por unidade de comprimento, [μF/m]
 Cie= Capacitância de surto entre espiras, por unidade de comprimento, [μF/m]
 Ri= Resistência elétrica do sistema isolante, por unidade de comprimento, [Ω/m]

É importante assinalar que as reatâncias distribuídas por unidade de comprimento são diferentes nas regiões das ranhuras e nas cabeças de bobinas, por causa da diferença na configuração destas regiões, bem como devido a que a porção dentro das ranhuras está embebida no ferro, o que lhe confere maior indutividade.

Para efeitos de simplificação seja considerado que a resistência em série (R) é pequena comparada com a reatância em série (L) e que a resistência elétrica do sistema isolante em paralelo seja muito maior do que a reatância capacitiva contra a massa. Ainda para simplificação seja considerada uma capacitância resultante entre “Cie” e “Cim”,

$$C = 2 \cdot (Cie + Cim) \quad [\mu F/m]$$

O circuito equivalente resultante será então conforme a Fig. 4.

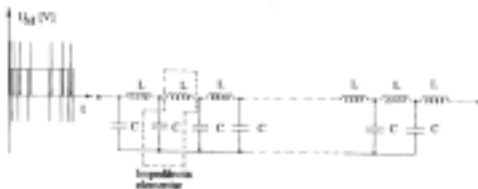


Fig.4 – Circuito equivalente simplificado, para propagação dos pulsos.

Com isto a impedância característica (ou impedância de surto) resultante de um grande número de impedâncias elementares ligadas consecutivamente em série, pode ser calculada em função de somente um elemento. Desta forma Ter-se-á a equação

$$Z_o = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad [OHMS]$$

a qual é independente da frequência.

A velocidade de propagação dos pulsos que entram nos terminais do motor, através do enrolamento será

$$V = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad [m/s]$$

Os valores de L e C usados na determinação de Zo devem ser originados de uma ponderação entre as partes do enrolamento embebida pelo ferro (ranhuras) e a das cabeças de bobinas, ou seja, deve ser dado o devido “peso” conforme a parcela de contribuição que cada uma tem nos parâmetros resultantes.

5. INFLUÊNCIA DO CABO ALIMENTADOR ENTRE INVERSOR E MOTOR

a) Reflexão das ondas incidentes:

Cabos suficientemente longos podem apresentar, em função do rise-time (tempo de crescimento do pulso tr) e da frequência de pulsação, um comportamento tal como uma linha de transmissão, onde aparecem as ondas incidentes e refletidas de tensão (ver fig.1) [4]. É importante salientar que com os pequeníssimos rise-times (tempos de crescimento da tensão do pulso) dos conversores modernos, um comprimento de cabo relativamente pequeno já pode apresentar este comportamento.

O tempo de crescimento dos pulsos de tensão nos terminais do motor depende do processo de controle do conversor, da velocidade de operação dos componentes utilizados (chaveamento) e dos comprimentos dos cabos entre motor e inversor [2]. Os pulsos (trem de pulsos), na saída do inversor, percorrem como ondas progressivas o comprimento do cabo com impedância característica Zc e são refletidos nos bornes do motor por causa da maior impedância característica Zo deste. Com isso a amplitude de tensão nos bornes do motor fica aumentada de um certo valor em função desta reflexão.

Em função das impedâncias características do motor e do cabo, o fator de reflexão é dado por

$$r = \frac{2 Z_o}{Z_o + Z_c} \quad [pu]$$

o qual ocorre quando o tempo de crescimento do pulso tr de tensão imposto pelo conversor, é menor que o dobro do tempo de percurso da onda de tensão através do cabo [2,6].

Com isto a tensão nos bornes do motor será

$$U_M = r \cdot U_{dc} \quad [V]$$

onde

U_{dc} = tensão cc do circuito intermediário (saída do retificador), [V]

$$U_{dc} \cong \sqrt{2} \cdot U_N \quad [V]$$

U_N = tensão nominal de saída do conversor (harmônica fundamental), [V]

Portanto
$$U_M = r \cdot \sqrt{2} \cdot U_N \quad [V]$$

A máxima reflexão ocorre quando

$$tr = 2 \cdot \frac{l_c}{V_c} \quad [\mu s]$$

onde

l_c = comprimento do cabo, [m]

V_c = velocidade da onda no cabo, [m/ μ seg]

Portanto, o valor da reflexão “r” da onda incidente, bem como a tensão resultante nos bornes do motor U_M , depende da impedância característica do cabo e do tempo de crescimento do pulso (rise time) chaveado pelo conversor.

b) Over shoot na entrada do motor devido à indutância do cabo:

Seja considerado que o cabo alimentador entre o inversor e o motor apresenta uma indutância própria de valor L_c . Pela lei de Lenz poder-se-á ter a seguinte tensão auto induzida no cabo em função da variação da corrente.

$$\Delta U = -L_c \cdot \frac{di}{dt} \quad [V]$$



Fig. 5–Tensão auto induzida no cabo (ΔU).

Dependendo do ângulo de defasagem da corrente no tempo em relação à tensão, Ter-se-á um acréscimo resultante nos bornes do motor maior ou menor. Fasorialmente, tem-se:

$$\vec{U}_M = r \cdot \sqrt{2} \cdot \vec{U}_N + \Delta \vec{U} \quad [V]$$

Supondo um ângulo de defasagem para a onda de corrente “i” de $\frac{\pi}{2}$ radianos em atraso, quando esta estiver decrescendo, a onda de tensão estará aumentando. Com isto a derivada $\left(\frac{di}{dt}\right)$ será negativa e o resultado ΔU será positivo e somar-se-á ao valor total para U_M . Para efeito de simplificação, considerando que ΔU esteja em fase com o pulso ($r \cdot \sqrt{2} \cdot U_N$), resulta

$$OS = \frac{\Delta U}{\sqrt{2} U_N} \quad [pu]$$

$$U_M = r \cdot \sqrt{2} \cdot U_N + OS \cdot \sqrt{2} \cdot U_N \quad [V]$$

onde OS = fator de over shoot devido à indutância própria do cabo.

Portanto o pulso de tensão nos terminais do motor, em função da reflexão da onda incidente e em função da indutância própria do cabo (over shoot), será:

$$U_M = (r + OS) \cdot \sqrt{2} \cdot U_N \quad [V]$$

6. GRADIENTE DE POTENCIAL NOS ENROLAMENTOS

Os rápidos tempos de comutação associados ao trem de pulsos que ocorre de maneira continuada, fazem com que o esforço sobre o sistema isolante seja muito elevado. Os esforços que o isolamento sofre podem ser comparados com os produzidos por ondas progressivas de descargas atmosféricas (raios), com a diferença fundamental de que neste caso não se tratam de ocorrências aleatórias e eventuais, mas que acontecem continuamente na alta frequência de pulsação (chaveamento) [2, 7].

Com isto as taxas de crescimento da onda de tensão relativamente às distâncias de isolamento, ou seja, os gradientes de potencial nas diversas partes do sistema isolante assumem uma proporção muito grande, tornando-se decisivos, visto que os tempos para ocorrer a degradação dos materiais isolantes e conseqüentemente a vida útil, dependem grandemente destes gradientes.

Os gradientes de potencial podem ser separados em três tipos distintos:

a) Contra a massa (núcleo magnético / carcaça)

Este gradiente ocorre principalmente no interior das ranhuras, sendo devido à diferença de potencial entre os condutores e a massa (pacote de chapas ou carcaça). O sistema de isolamento para este caso é composto pelo filme isolante que envolve a parte interior da ranhura mais a espessura do isolante em torno dos fios condutores. Na prática e principalmente para um sistema de enrolamentos randômicos (baixa tensão), pode ser acrescentado ainda algum trecho do sistema isolante composto também pelo material impregnante, ou até por algum indesejável espaço de ar.

b) Entre espiras

O gradiente de potencial entre as espiras, em função da rapidez do crescimento de cada pulso do trem de pulsos do inversor, constitui-se num caso vital para o sistema de isolamento. Este gradiente depende das espiras que se encontram colocadas justapostas, ou

seja, de quais sejam as espiras colocadas imediatamente próximas.

É esperado que a primeira (ou primeiras) espira(s) da primeira bobina tenha(m) a maior ddp relativamente às demais e que dependendo de sua vizinhança imediatamente próxima poder-se-á ter até o máximo potencial do pulso entre estas espiras. Alguma incerteza ocorre com os enrolamentos randômicos, dada a aleatoriedade nas posições espaciais relativas de cada espira, dentro de uma mesma ranhura.

O sistema de isolamento para este caso é composto pelos isolantes em torno dos fios, o qual para o caso de duas espiras justapostas corresponde à soma das espessuras dos isolantes em torno de cada fio. O sistema genericamente pode conter ainda, além dos isolantes dos fios, também o material isolante da impregnação e até algum indesejável espaço de ar.

c) Entre fases

Neste caso o gradiente de potencial depende da diferença de potencial entre os condutores adjacentes de cada fase. Ocorre principalmente nas cabeças de bobinas onde a proximidade entre as fases é maior, sendo separadas em algumas posições somente por um filme isolante específico. O sistema isolante correspondente é então formado por este filme isolante específico entre fases mais duas vezes o isolante em torno de cada fio justaposto, podendo conter ainda o material de impregnação e algum espaço de ar.

7. INFLUÊNCIA DA FREQUÊNCIA DE PULSAÇÃO

Associada aos efeitos originados pelo rápido crescimento dos pulsos está a frequência com que estes pulsos são produzidos. Ao contrário dos impulsos provenientes de manobras de rede, os quais são eventuais, neste caso trata-se de um trem de pulsos que é mantido numa frequência determinada. Esta frequência nos dias atuais, em função da rápida evolução da eletrônica de potência, atinge valores da ordem de 20kHz. Quanto maior a frequência de pulsação do conversor mais rápida será a degradação do sistema isolante. A dependência do tempo de vida útil do isolamento em função da frequência de pulsação, não é uma relação simples, conforme pode ser obtido de pesquisas experimentais.

Então, de resultados empíricos, obtidos através de experiências práticas, pode-se concluir que abaixo de 5 kHz o tempo de vida do isolamento é inversamente proporcional à frequência, ou seja, $TL=A/f$, onde “A” é uma constante e “f” a frequência de pulsação. Já para frequências de pulsação acima de 5kHz o tempo de vida útil é proporcional ao inverso do quadrado da

frequência, isto é, $TL=B/f^2$, onde “B” é outra constante [3].

8. DESCARGAS PARCIAIS

As descargas parciais também conhecidas como efeito “corona” resultam do rompimento da rigidez dielétrica do ar contido em espaços vazios (Voids) dentro do sistema de isolamento sólido de um motor. A este tipo de descargas, originárias destes espaços vazios (Voids), dá-se o nome de descargas parciais de volume. Além disso existem descargas parciais originadas na superfície dos isolantes, as quais são chamadas de descargas parciais de superfície. Havendo descargas parciais num sistema isolante não significa a falha imediata do isolamento. O rompimento da rigidez dielétrica do ar pelo campo elétrico resulta na formação de ozônio e óxido nítrico. Longas exposições às descargas parciais causarão deterioração nos materiais isolantes, sendo que o tempo necessário para ocorrer uma falha completa é uma função de cada material em particular [5].

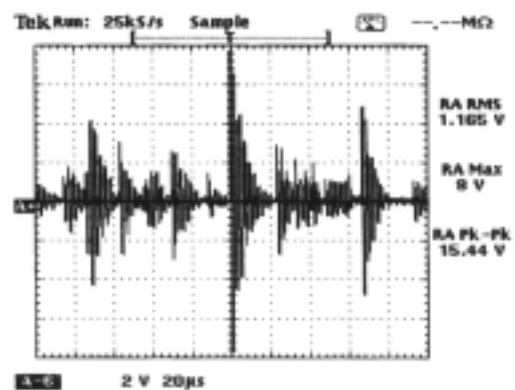


Fig.6 – Descargas parciais contra a massa, medidas através de osciloscópio de alta frequência e filtro LC série e paralelo.

Cavidades com ar dentro do volume de um material sólido ou nas interfaces das superfícies separadoras, constituem-se numa importante fonte de problemas para um sistema de isolamento. Devido à tensão elétrica submetida ao sistema, originar-se-ão campos elétricos nas cavidades de ar. Se este campo elétrico ultrapassar um certo valor limiar, o qual é função das condições do ar local (temperatura, umidade, comprimento do gap,...) dar-se-á início às descargas parciais. Estas descargas causam a degradação dos materiais e podem conduzir a uma falha completa no sistema isolante.

A diferença na permissividade elétrica do ar, relativamente aos materiais sólidos, facilita a formação de altos gradientes de potencial sobre estes espaços de ar, os quais podem ultrapassar os valores limiares e conduzir às descargas parciais. O resultado pode ser a erosão com a criação de caminhos

condutivos (tracking) na superfície dos materiais isolantes. Adicionalmente pode ocorrer, em função da umidade e/ou das impurezas algum efeito de eletrólise, com conseqüente mobilização de cargas iônicas. A deterioração surgida, bem como o tempo necessário, dependerão das características químicas de cada caso particular de material [8].

Tanto os cálculos como as medições experimentais demonstram que os valores limiares de tensão elétrica para início das descargas parciais tomam-se maiores quanto maiores forem as espessuras dos materiais isolantes sólidos. O tempo para o rompimento do dielétrico de um sistema de isolamento depende da intensidade das descargas parciais, da tensão limiar para início das descargas, das espessuras dos materiais isolantes envolvidos e da resistência à erosão de cada material em particular. As tensões limiares e conseqüentemente a vida útil serão maiores também em função da qualidade da impregnação das bobinas do enrolamento. Esta qualidade depende do material impregnante, bem como da porcentagem de sólidos retidos preenchendo os espaços entre os fios condutores. Conforme pesquisa realizada na Universidade Técnica de Dresden (Alemanha), não havendo descargas parciais, mesmo para períodos de funcionamento da ordem de dois anos, sob temperaturas normais de trabalho, não se observa nenhum rompimento do dielétrico do sistema de isolamento [1]. Isto nos conduz a que períodos satisfatórios de vida útil podem ser atingidos se as descargas parciais no sistema de isolamento do enrolamento forem evitadas.

Para uma avaliação experimental que possa conduzir a uma previsão da vida útil esperada do motor, podem ser usados ensaios de descargas parciais. Nestes ensaios são medidas as tensões limiares para início e extinção das descargas e é feita a contagem do número de cargas (normalmente em pico Coulombs) provenientes destas descargas em função de diferenças de potencial previamente estabelecidas (1.25, 1.5, 2.0, 2.5 kV), aplicadas no sistema isolante contra a terra (núcleo magnético e carcaça). O ensaio é feito com cada fase individualmente, onde quando uma dada fase estiver sendo ensaiada as demais permanecem aterradas. Desta forma o ensaio verifica também a interação entre as fases, detectando as cargas correspondentes.

As cabeças de bobinas, particularmente na curva logo após a parte reta que sai das ranhuras (Núcleo), em função desta configuração diferente, apresentam um ponto de fraqueza por onde pode dar-se início às descargas parciais. Isto se deve à rápida variação da geometria na região da curva, logo após a parte reta, por onde se originam grandes gradientes de potencial

contra a massa (núcleo magnético). Para evitar isto é necessário alongar suficientemente o comprimento da parte reta e ainda para casos mais críticos, particularmente para motores de alta tensão (> 600V), pode ser necessário evitar curvas bruscas, fazendo-as então com adequados valores de raios geométricos.

Para maiores altitudes (acima de 1000m) o ar torna-se mais rarefeito, reduzindo conseqüentemente as tensões limiares para início das descargas parciais. É necessário, portanto, considerar a altitude, visto que a rigidez dielétrica do ar diminui à medida que a altitude aumenta.

9. INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA.

A altas temperaturas a resistência aos esforços entre espiras é grandemente reduzida [3]. Os isolantes dos motores são normalmente sujeitos a temperaturas que podem chegar a valores da ordem de 155° C (classe F). Com o aumento da temperatura a permissividade elétrica dos materiais isolantes aumenta, deixando maiores campos elétricos sobre os espaços de ar entre as partes isolantes. Ainda com a elevação da temperatura cai a rigidez dielétrica do ar devido à redução de sua densidade de massa [1]. Com isto a tensão limiar para início de descargas parciais diminui cerca de 15 a 20%, comparada com seu valor à temperatura ambiente.

Portanto, temperaturas mais altas podem provocar um envelhecimento mais rápido do sistema de isolamento dos motores.

10. SISTEMA DE ISOLAMENTO.

Devido aos efeitos extras originados pela pulsação dos conversores, quando alimentando motores elétricos, o sistema de isolamento convencional, o qual tem sido usado com amplo sucesso em todos os casos de alimentação com fontes senoidais tradicionais (50/60Hz), pode não atender aos requisitos necessários para este tipo de alimentação. Neste caso o sistema de isolamento deve ser feito com materiais mais resistentes à degradação (erosão) quando submetidos a elevados campos elétricos e terem os espaços entre as espiras (fios) devidamente preenchidos com material impregnante sólido, evitando a presença de espaços de ar e conseqüentemente as descargas parciais. O material de uma das camadas das paredes isolantes dos fios, para os casos mais críticos, pode conter óxidos metálicos (óxido de Titânio, por exemplo) os quais funcionam como espalhadores de cargas, não deixando que eventuais descargas parciais se choquem sempre contra o mesmo ponto sobre o material isolante. Desta forma esta camada de óxido

metálico toma o fio resistente ao ataque de descargas parciais e conseqüentemente protege o sistema de isolamento de degradações prematuras [9].

Portanto o sistema de isolamento para motores alimentados por conversores de frequência (retificador + inversor), os quais ficam submetidos a elevados gradientes de potencial entre espiras, entre fases e contra a massa. Devem ser construídos com materiais isolantes mais resistentes à degradação em função destes campos elétricos e devem ser impregnados através de sistemas que depositem uma grande porcentagem de material sólido para preencher os espaços entre os fios, no interior das ranhuras e cabeças de bobinas, evitando assim a formação de descargas parciais.

As contaminações tais como óleos, sais, ácidos, graxas, poeiras, detergentes, desinfetantes, pós metálicos, etc, especialmente quando combinados com a umidade ambiente, reduzem drasticamente a rigidez dielétrica. Isto facilita a formação de caminhos condutores (tracking) provocando a redução nas tensões limiares para início de descargas parciais. Com isto o isolamento entre espiras, entre fases e contra a massa pode ficar grandemente comprometido. Para evitar este tipo de problema a solução é manter os motores longe das contaminações ou usar motores totalmente fechados quando os ambientes forem contaminantes. Para evitar a formação de água condensada (umidade) é necessário equipar com aquecedores de parada, sobretudo quando o motor permanecer parado por várias horas seguidas.

11. VIDA ÚTIL EFETIVA DOS MOTORES :

Conforme mostrado até aqui, as causas e influências que dão origem ao envelhecimento do sistema isolante dos motores de indução, quando alimentados por conversores de frequência, são múltiplas e dependentes também de condições aleatórias ou pelo menos estatísticas, sobretudo para o caso dos enrolamentos randômicos, os quais correspondem à grande maioria.

“Envelhecimento” significa uma mudança nociva à capacidade de isolar do sistema isolante. A natureza desta mudança pode ser muito variada. As propriedades de um sistema isolante, as quais são influenciadas pelo envelhecimento, dependem do tipo de esforço (stress) e do tipo de material que está sendo usado. Os esforços que produzem envelhecimento, chamados de “fatores de envelhecimento”, podem ser divididos normalmente em quatro tipos básicos: Elétricos, térmicos, mecânicos e ambientais [8].

A falha efetiva do sistema isolante significa o rompimento da rigidez dielétrica dos isolantes sólidos, colocando em curto-circuito as partes energizadas. A vida útil efetiva pode ser determinada medindo o tempo necessário para o rompimento completo do dielétrico do sistema isolante. Fazendo isto em tempo real tomar-se-ia muito exaustivo, considerando que seja esperado uma duração normal de alguns anos. Por isto, o processo de envelhecimento normalmente é acelerado em laboratório de testes, para reduzir o tempo de vida. Isto é feito usualmente aumentando a amplitude do tipo de esforço estressante sob estudo. Quando são disponíveis dados suficientes de envelhecimento, aspectos estatísticos podem ser considerados. Acelerando o processo de envelhecimento para um dado tipo de esforço (stress) é possível que um outro tipo de esforço que também cause envelhecimento passe a ser dominante, ou ainda que as mudanças no processo de envelhecimento sejam não lineares em função do aumento da amplitude estressante. Desta forma, as extrapolações devem ser feitas com muita prudência, visto que podem conduzir a resultados errados.

Os ensaios de envelhecimento, diante das dificuldades apresentadas, tem sua validade mais dirigida para efeitos comparativos, visto que nestes casos nenhuma extrapolação precisa ser feita e os materiais, métodos e processos podem ser comparados em condições idênticas.

Os sistemas isolantes, os quais são expostos a diversos fatores estressantes podem, adicionalmente ao envelhecimento produzido por cada fator, experimentar o envelhecimento devido aos efeitos da sinergia. Os efeitos da sinergia são devidos à interação entre os diferentes fatores estressantes [8].

Portanto, a estimativa do tempo de vida útil efetiva de um dado motor, em função da multiplicidade de fatores estressantes, é uma tarefa altamente complexa, onde interagem os efeitos devidos às variações nos processos construtivos, aqueles em função das reações físico-químicas dos materiais isolantes envolvidos, a temperatura e todos os fatores ambientais relacionados com as contaminações e umidade. Além disso, em função das interrelações entre os diversos fatores estressantes, aparece o efeito da sinergia. Diversos modelos foram criados para representar o comportamento de cada fator estressante e permitir avaliar o tempo de vida esperado. O cálculo teórico através da aplicação das equações que governam os diversos fatores estressantes, em função da complexidade, se não permite exatamente estimar a vida útil esperada de

forma absoluta, pelo menos permite tirar conclusões comparativas valiosas, já que pode mostrar as tendências esperadas para cada caso.

12. FILTROS DE AMORTECIMENTO.

Há duas maneiras básicas para reduzir ou aliviar os efeitos estressantes sobre o sistema isolante: a primeira é aumentando a resistência dos fios aos efeitos dos altos gradientes de potencial, conforme comentado no item 10, e a segunda é através do uso de filtros amortecedores, sobre os quais estar-se-á abordando em seguida.

O método mais simples de filtragem é inserir em série com os cabos, entre inversor e motor, um adequado valor de reatância indutiva, a qual atua como limitadora de variação de corrente filtrando a onda e reduzindo o ruído. Este método afeta a performance dos transitórios do conversor além de ser volumoso e caro.

Através de filtros passa baixo de primeira ordem R-C, aplicados na entrada do motor, as sobretensões impulsivas e as taxas dv/dt podem ser significativamente reduzidas. Com isto as componentes de reflexão serão grandemente atenuadas, bem como serão reduzidos os gradientes de potencial e conseqüentemente os esforços estressantes causadores de envelhecimento.

Juntando os dois tipos de filtros anteriores pode-se formar um filtro RLC, onde a indutância L é colocada em série e o conjunto R-C em paralelo. Instalando estes filtros tornam-se permissíveis comprimentos de cabos bastante aumentados relativamente à condição sem filtros.

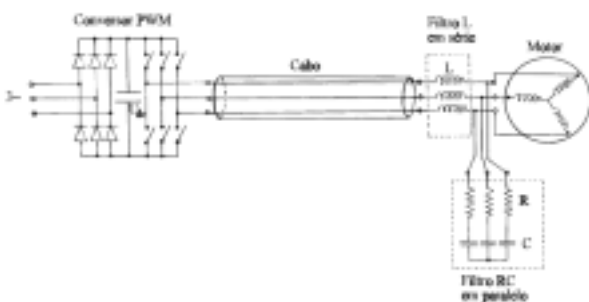


Fig.7 Filtragem através de indutância L em série e impedância RC em paralelo.

Devido a condições técnico-econômicas os filtros ficam normalmente restritos aos projetos para grandes acionamentos. Para aplicações que utilizam motores pequenos e médios, além de não usar filtros, em geral os usuários preferem utilizar motores de fabricação em série, mantidos em estoque, os quais tanto podem ser alimentados por fontes senoidais (50/60Hz) quanto por conversores (PWM). Nestes

casos, portanto, a eficiência do sistema de impregnação é fundamental para garantir uma suficiente vida útil a estes motores, bem como, nos casos mais críticos, o uso de fios especiais, mais resistentes à degradação, pode ser necessário.

13. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

- [1] Failure mechanism of the interturn insulation Low voltage Electric Machines Fed by pulsecontrolled inverters M. Kaufhold, F. Bömer, M. Eberhardt and J. Speck.
- [2] Beanspruchung der Wicklungsisolierung von Drehstrommaschinen etz Bd. 114(1993) Heft 17.
- [3] Dielectric integrity of magnet wire insulations under multi-stresses. Improved magnet wire for inverter fed motors Revista APPLIANCE Jan/1996.
- [4] Application Issues for PWM Adjustable speed AC motor drives A. Von. Jouanne, P. Enjeti, and W. Gray.
- [5] Polyphase Induction Motors Analysis, Design, and Application Paul. Cochran
- [6] Zulässige Spannungs beanspruchung der Wicklungsisolierung von Drehstrom-Norm-Motoren bei Speisung durch Pulsumrichter H. Auinger, Frankfurt. Elektrie, Berlin 48 (1994).
- [7] Esforços sobre isolamento do enrolamento alimentado por conversor. Melhoramento do isolamento. Obering H. Greiner. EMA 3/96.
- [8] Multifactor Ageing Models – origin and similarities. Anne Cathrine Gjaerde. Norwegian Electric Power Research Institute (EFI).
- [9] A New partial discharges resistant wire enamel insulation for rotating machines. A. Björklund, C. Fröling G. Svensson. The 7th BEAMA international Electrical insulation Conference.