

NOVAS CONTRIBUIÇÕES AO ESTUDO DAS SOBRETENSÕES TRANSITÓRIAS E CORRENTES DE MODO COMUM EM SISTEMAS DE ACIONAMENTO DE MOTORES POR INVERSORES

H. de Paula, M. V. C. Lisboa, J. F. R. Guilherme, W. C. Boaventura e M. L. R. Chaves*

Laboratório de Aplicações Industriais – Departamento de Engenharia Elétrica – UFMG

Universidade Federal de Minas Gerais, *Universidade Federal de Uberlândia

Av. Antônio Carlos, 6627 – Pampulha / CEP 31.270-901 Belo Horizonte, MG

helder@cpdee.ufmg.br / www.cpdee.ufmg.br/~helder

Resumo – No tocante a sistemas de acionamento de motores com inversores PWM, tem-se que o fenômeno da propagação e reflexão dos pulsos no cabo, originando sobretensões diferenciais e correntes de modo comum, encontra-se já extensivamente abordado na literatura. Não obstante, algumas questões relacionadas a tais fenômenos de alta frequência ainda carecem de maior esclarecimento. Tal, por exemplo, é o caso da influência das características do cabeamento utilizado entre o conversor e o motor na intensidade desses fenômenos transitórios. Uma melhor caracterização das correntes de retorno pela terra, explicitando as parcelas referentes ao cabo e ao motor na sua composição, também mostra-se necessária. Neste contexto, este trabalho apresenta resultados de investigações contemplando tais aspectos, dentre outros, contribuindo assim com o tema em estudo.

Palavras-chave – Cabeamento, correntes de modo comum, modelos para alta frequência, parâmetros de cabos, propagação e reflexão de ondas, sobretensões transitórias.

Abstract – As far as PWM motor drives are concerned, the pulse propagation and reflection phenomena in the cable, resulting in differential overvoltages and common mode currents, have been extensively investigated. Nevertheless, some issues concerning such phenomena remain unclear. That is the case of the converter-to-motor cabling influence on the intensity of these high-frequency voltages and currents. A better characterization of the earth-return currents, defining the contribution of the cable and motor in their composition, is also necessary. In this context, this work presents results from investigations comprising these aspects, among others, thus contributing to the topic under study.

Keywords – Cable parameters, cabling, common mode currents, high frequency models, transient overvoltages, wave propagation and reflection.

I. INTRODUÇÃO

Em seu princípio, a aplicação de conversores de frequência no acionamento de motores de indução veio acompanhada de diversos problemas, tais como [1]: ventilação insuficiente em baixas rotações; perdas adicionais produzidas pelos harmônicos gerados pelo inversor; elevação da temperatura de operação da máquina, com possibilidade de redução da sua vida útil e necessidade de “*de-rating*”; oscilações no conjugado desenvolvido e problemas associados; dentre outros.

Em virtude dos avanços da eletrônica de potência e dos microprocessadores realizados nas últimas décadas, tais problemas foram superados, embora outros, como consequência, tenham surgido [2, 3]. Um deles é a ocorrência de oscilações transitórias de tensão nos terminais do motor, que, em alguns casos, podem alcançar valores superiores a três vezes a tensão do barramento C.C. do conversor (V_{CC}) [4]. Casos críticos foram relatados onde a vida útil do motor foi reduzida a poucas semanas [5]. Além disso, em cada transição da tensão de zero para V_{CC} ou deste valor para zero, a capacitância distribuída do cabo deve ser sucessivamente carregada e descarregada, de forma que, sobreposta à corrente de saída do inversor, aparece uma parcela de corrente transitória e de alta frequência. Esta corresponde à corrente de carga do cabo, cujos picos, no caso de cabos mais longos, podem ser elevados o suficiente a ponto de causar a atuação da proteção do inversor contra sobrecorrentes, ocasionar sobreaquecimento e destruição da capacitância de “*snubbers*” e ainda resultar em medições inadequadas para fins de realimentação [6 - 8].

Um outro problema diz respeito à circulação de correntes de alta frequência pela terra. A tensão de modo comum gerada pelo inversor excita os acoplamentos capacitivos entre os condutores e partes do motor à terra, produzindo manifestações oscilatórias de corrente de modo comum em cada dv/dt da tensão correspondente. Tais correntes causam problemas de interferência eletromagnética em ambientes industriais, atuação indevida de relés de proteção de falta à

terra e paradas de máquinas por falhas no rolamento [9]. Correntes de modo comum com amplitude de 50 A foram medidas em um sistema de uma indústria têxtil, composto por 75 motores de 3 kW [8]. A título de ilustração, a figura 1 mostra as sobretensões diferenciais e as grandezas de modo comum em um sistema de acionamento de motor de indução de 220/380 V, 1,5 cv, conectado a um conversor de frequência através de um cabo de 4 mm² com 100 metros de extensão (medição em laboratório).

Os fenômenos mencionados nos parágrafos precedentes têm sido largamente discutidos na literatura [2 - 12] há mais de uma década; não obstante, diversos pontos ainda requerem maiores investigações. Tal é o caso, por exemplo, da influência das características do cabeamento empregado na interligação do inversor ao motor nos valores de tais tensões e correntes de alta frequência. Uma melhor caracterização das correntes de terra, evidenciando a influência do tempo de subida dos pulsos na amplitude das mesmas e a combinação das parcelas relativas ao cabo e ao motor, também mostra-se necessária. Cabe ressaltar que considerações preliminares acerca da influência do tipo e arranjo de cabos no nível das sobretensões foram apresentadas em [13], fruto de ponderações teóricas simplificadas. Através de modelagens apropriadas, as quais já foram exaustivamente testadas e validadas em [10, 12], simulações computacionais envolvendo as questões supracitadas foram conduzidas, cujos resultados são mostrados no presente trabalho. Adicionalmente, são também apresentadas expressões para o cálculo aproximado das sobretensões diferenciais e correntes de modo comum, as quais requerem apenas informações sobre o cabeamento empregado e o tempo de subida do pulso. Tais são as principais contribuições deste trabalho.

II. CONSIDERAÇÕES SOBRE A PLATAFORMA COMPUTACIONAL UTILIZADA

Como bem se sabe, a simulação computacional dos fenômenos descritos na seção anterior requer a utilização de modelos bastante sofisticados, apropriados a estudos de alta frequência [10, 12]. No que tange o cabo, basicamente dois são os requisitos: i) correta representação da variação de sua resistência e indutância com a frequência (efeito pelicular), até a faixa de MHz; ii) capacidade de reproduzir os fenômenos de propagação e reflexão de ondas. Com relação ao motor, um dos aspectos cruciais é a correta representação das capacitâncias intrínsecas do motor, as quais, em alta frequência, representam caminhos de baixa impedância para os pulsos de tensão, cujos rápidos tempos de subida relacionam-se com elevadíssimas frequências.

No caso do presente trabalho, a modelagem empregada para a representação do cabo é aquela apresentada em [12], a qual cumpre com os requisitos supracitados e permite a determinação das grandezas diferenciais e de modo comum simultaneamente, de uma forma bastante simples e eficiente. É importante ressaltar que tal modelagem já foi amplamente testada e devidamente validada, produzindo resultados muito satisfatórios, tal como pode ser verificado na referência em questão. Com relação ao motor, o modelo utilizado é aquele proposto em [10], que comprovadamente conduz a resultados

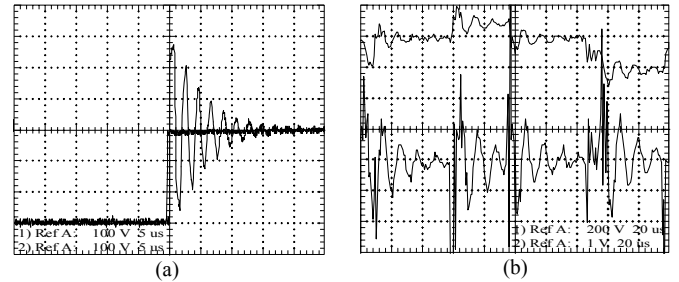


Fig. 1: (a) Tensões medidas na saída do inversor e nos terminais do motor. (b) Tensão de modo comum medida nos terminais do motor (superior) e corrente correspondente (1 V \approx 0,61 A – curva inferior).

confiáveis. Em ambos os casos, todo o procedimento para a elaboração dos modelos encontra-se bastante claro e detalhado nas referências correspondentes. Neste trabalho, o simulador utilizado foi o ATP (“*Alternative Transients Program*”), de utilização livre (gratuito).

O sistema analisado é composto por cabos unipolares de 4 mm², constituídos pelo condutor propriamente dito, isolamento e capa externa. A isolamento pode ser em EPR ou PVC, enquanto a capa externa é sempre em PVC, tal como no caso dos cabos comerciais pesquisados. Com relação aos valores das permissividades relativas destes materiais, diferentes fabricantes foram consultados, mas nenhum deles detinha tal informação. Assim sendo, foram utilizados os valores médios encontrados na literatura [14 - 16], quais sejam: ϵ_r (PVC) = 5,0 e ϵ_r (EPR) = 3,0.

Na representação do sistema de cabos, os mesmos encontram-se instalados em bandejas metálicas aterradas e dispostos em arranjos triangular ou planar. No caso deste último, a distância entre os cabos equivale a duas vezes e meia o seu diâmetro externo. Tal espaçamento foi escolhido por possibilitar, quando do projeto e instalação de um sistema real, a eliminação do fator de agrupamento nos cálculos para o dimensionamento dos condutores. Todas essas informações (características do cabo, arranjo e forma de instalação) foram utilizadas na rotina “*Cable Constants*” do ATP para a determinação dos parâmetros necessários à elaboração dos modelos, tal como detalhado em [12].

O inversor foi modelado por fontes de tensão de pulsos, reproduzindo a forma de onda PWM. Cada pulso foi representado como sendo trapezoidal, com tempos de subida (“*rise time*”) entre 90 e 400 ns, que correspondem aos valores tipicamente encontrados nos inversores comerciais. A tensão de modo comum aparece naturalmente a partir da combinação dos pulsos das três fases. Com relação ao motor de indução, aquele representado nas simulações tem potência nominal de 2 cv.

A título de ilustração, são mostradas, na figura 2, as tensões nas fases (correspondentes à tensão entre cada fase e o ponto médio do barramento C.C.) e aquela resultante entre o neutro e a terra (modo comum), obtidas pelo modelo implementado. A figura 3 ilustra as oscilações de tensão nos terminais do motor e as correntes de modo comum, para o caso do arranjo triangular com 80 metros de cabo. Na figura 4 tem-se a resposta em frequência da impedância fase-neutro do motor modelado, tanto em módulo como em ângulo. Observa-se que, no que diz respeito à impedância vista entre uma fase e o neutro, o motor passa a apresentar caráter capa -

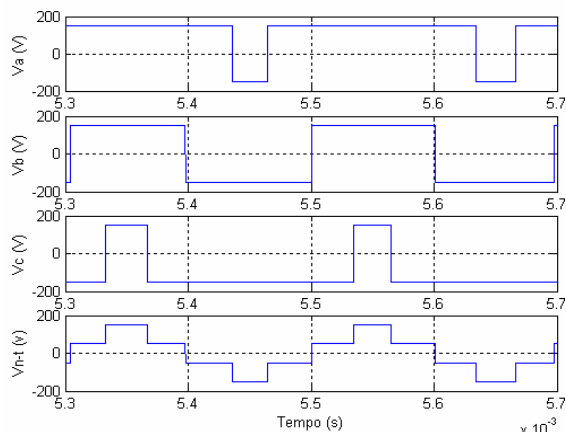


Fig 2: Tensões nas fases (correspondente à tensão entre cada fase e o ponto médio do barramento C.C.) e a tensão resultante entre neutro e terra (Vn-t).

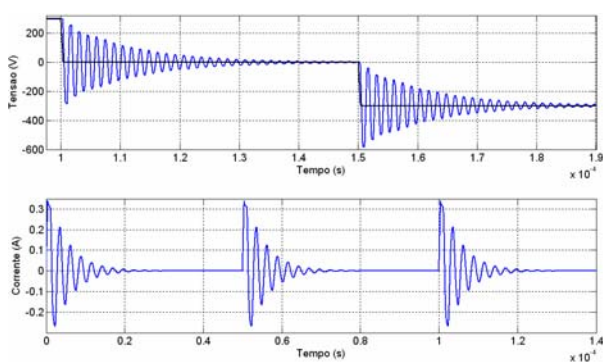


Fig 3: Curva superior: tensões no início (em preto) e no final do cabo (em azul). Curva inferior: corrente de modo comum medida no aterramento da fonte (cabo de 80 metros, arranjo triangular).

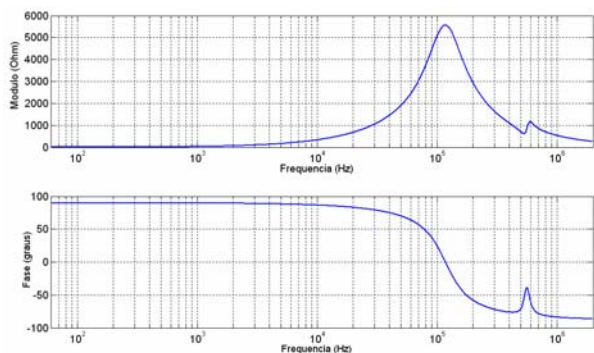


Fig. 4: Resposta em frequência da impedância fase-neutro do motor modelado: módulo (curva superior) e ângulo (curva inferior).

citivo a partir de pouco mais de 100 kHz. Com relação à impedância de fase para a terra (não mostrada por limitações de espaço), tem-se que esta é sempre capacitiva, com valores progressivamente menores à medida em que a frequência aumenta.

III. NOVAS INVESTIGAÇÕES ACERCA DAS SOBRETENSÕES DIFERENCIAIS E CORRENTES DE MODO-COMUM

Conforme dissertado na seção I, importantes aspectos relativos aos fenômenos transitórios sob análise ainda carecem de maiores esclarecimentos, constituindo, portanto,

objeto de estudo deste trabalho. Nas subseções a seguir, serão apresentados os resultados e análises correspondentes a cada uma das questões que foram contempladas no estudo realizado.

A. Influência do tempo de subida do pulso nas sobretensões diferenciais e correntes de modo comum

A influência do tempo de subida dos pulsos na amplitude das sobretensões transitórias já é bastante conhecida, embora não se tenha encontrado na literatura informação equivalente para o caso das correntes de modo comum. Quanto menor for o tempo de subida, maior será o pico da oscilação de tensão nos terminais do motor para um mesmo comprimento de cabo. Define-se como “comprimento crítico” o comprimento mínimo de cabo necessário para a ocorrência de uma reflexão plena, que, para coeficiente de reflexão igual a 1, resulta em 2 p.u. de tensão nos terminais do cabo. Na subseção “B” tal assunto será tratado com maiores detalhes, quando as formulações pertinentes serão mostradas e um desenvolvimento análogo será apresentado para as correntes de modo comum.

A figura 5 mostra o nível de sobretensão esperado, em função do comprimento do cabo, para os diferentes tempos de subida analisados. Conforme a expectativa, quanto maior o tempo de subida, maior o comprimento crítico e, para um mesmo comprimento e cabo, menor a amplitude das oscilações de tensão. Além disso, sabe-se que para comprimentos de cabo superiores ao crítico, o tempo de subida não mais exerce influência, percebendo-se que em todos os casos as sobretensões atingem cerca de 1,94 p.u., indicando que o coeficiente de reflexão do motor é de aproximadamente 0,94. Valores de tensão superiores a esse, particularmente nas curvas referentes a $t_s = 90, 180$ e 270 ns, não são reais e apareceram devido a leves distorções na crista das oscilações da tensão simulada. Assim, o comprimento crítico deve ser tomado, nos gráficos da figura 5, como sendo o ponto onde tal nível de tensão é atingido pela primeira vez na curva (aproximadamente 12 metros para $t_s = 90$ ns).

No caso das correntes de modo comum, nota-se que, quanto menor o tempo de subida do pulso e maior o comprimento do cabo, maior é a sua amplitude. Todavia, isso procede apenas até um certo ponto, a partir do qual a mesma não mais se eleva, tornando-se independente do comprimento do cabo. Tal ponto será definido na subseção “B”. É importante ressaltar que, no caso da figura 6, o motor encontrava-se desaterrado, de forma que as correntes fluíam para a terra através apenas das capacitâncias do cabo à mesma. Aterrando-se também o motor, o comportamento das curvas se alteram, conforme será mostrado na subseção “D”.

B. Cálculo aproximado da amplitude e frequência das sobretensões transitórias e correntes de modo comum

Analisando-se os mecanismos do processo de propagação e reflexão dos pulsos, observa-se que o valor do comprimento crítico de um cabo pode ser calculado igualando-se o tempo de subida do pulso (t_s) a dois tempos de viagem (t_V) do pulso pelo cabo, obtendo-se:

$$l_c = \frac{t_s \cdot v}{2} \quad (1)$$

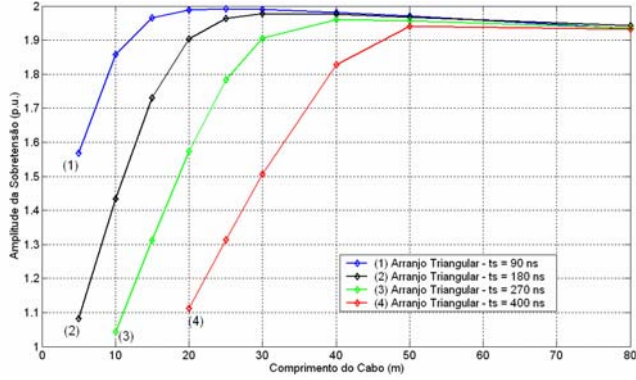


Fig. 5: Nível das sobretenções em função do comprimento do cabo, para diferentes tempos de subida – arranjo triangular.

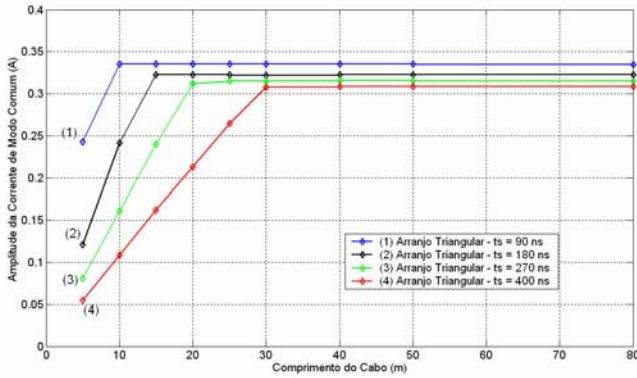


Fig. 6: Nível das correntes de modo comum em função do comprimento do cabo, para diferentes tempos de subida – arranjo triangular e motor desaterrado.

Além disso, é possível também se definir as seguintes condições para a ocorrência ou não das sobretenções:

- (i) $t_V < \frac{t_S}{4} \Rightarrow L_{cabo} < \frac{l_C}{2} \rightarrow$ Não há sobretenção.
- (ii) $\frac{t_S}{4} \leq t_V < \frac{t_S}{2} \Rightarrow \frac{l_C}{2} < L_{cabo} < l_C \rightarrow$ Sob. entre 0 e 1 p.u.
- (iii) $t_V \geq \frac{t_S}{2} \Rightarrow L_{cabo} \geq l_C \rightarrow$ Sobretenção de 1 p.u.

onde l_C é o comprimento crítico, L_{cabo} é o comprimento do cabo e v é a velocidade de propagação do pulso pelo cabo.

Para o caso (ii), o pico da oscilação de tensão nos terminais do motor (V_{mot}) pode ser calculado por [17]:

$$V_{mot} = 1 + \frac{2 \cdot L_{cabo} \cdot K_R}{t_S \cdot v} \quad (2)$$

onde K_R é o coeficiente de reflexão na junção cabo-motor, cujo valor situa-se na faixa de 0,9 a 0,95 para motores de indução de menor potência e reduz-se para cerca de até 0,6 para máquinas maiores [3].

Nas expressões (1) e (2), a velocidade de propagação v deve ser tomada como sendo aquela referente ao modo de seqüência positiva. Da mesma forma, o coeficiente de reflexão deve ser calculado utilizando as impedâncias características do cabo e do motor referentes a este mesmo modo. Conhecendo-se as características do cabeamento utilizado, basta representá-lo em rotinas do tipo “Cable

Constants” de simuladores para se determinar a sua matriz de resistências, indutâncias e capacitâncias, além das respectivas velocidades e impedâncias características modais. Maiores detalhes a esse respeito podem ser encontrados em [13].

Caso os parâmetros modais do cabo já sejam conhecidos, a velocidade de propagação e a impedância característica dos modos de seqüência positiva e zero podem ser determinados da seguinte forma:

$$v_i = \frac{1}{\sqrt{L_i \cdot C_i}} \quad (3)$$

$$Z_i = \sqrt{\frac{L_i}{C_i}} \quad (4)$$

onde L_i e C_i são a indutância e capacitância do modo em questão. Deste ponto em diante, as grandezas de modo comum e diferencial serão escritas com os índices “zero” e “pos”, respectivamente.

Como um período completo de sua oscilação corresponde a quatro tempos de viagem pelo cabo, a frequência das sobretenções transitórias e das correntes de modo comum podem ser então calculadas:

$$v = \frac{L_{cabo}}{t_v} \quad (5)$$

$$f_{V_{mot}} = \frac{v_{pos}}{4 \cdot L_{cabo}} \quad (6)$$

$$f_{I_{com}} = \frac{v_{zero}}{4 \cdot L_{cabo}} \quad (7)$$

onde os termos “ V_{mot} ” e “ I_{com} ” referem-se, respectivamente, às sobretenções transitórias e correntes de modo comum.

Tomando por base a análise clássica da energização de linhas de transmissão [18], propõe-se aqui, por analogia, a seguinte expressão para o cálculo da amplitude das correntes de modo comum:

$$I_{max} = \frac{\Delta V_{zero}}{Z_{zero}} = \frac{V_{CC}/3}{Z_{zero}} \quad (8)$$

onde ΔV_{zero} corresponde a cada dv/dt da tensão de modo comum (ver figura 2), V_{CC} é a tensão do barramento C.C. do conversor e Z_{zero} é a impedância de seqüência zero do cabo.

Uma vez que a dinâmica da propagação, reflexão e combinação de ondas, constituindo a tensão nos terminais do motor, aplica-se também ao modo comum, sugere-se, neste trabalho, a definição de um comprimento crítico também para as correntes de modo comum, dado por:

$$l_{CI} = \frac{t_S \cdot v_{zero}}{2} \quad (9)$$

Da mesma forma, partindo da expressão 2, propõe-se a seguinte fórmula para o cálculo da amplitude das correntes de modo comum para comprimentos de cabo inferiores ao crítico definido acima:

$$I_{com} = I_{max} \left[\frac{2 \cdot L_{cabo}}{t_S \cdot v_{zero}} \right] \quad (10)$$

Ou seja, para comprimentos de cabo superiores a l_{C1} , o pico da corrente de modo comum vale I_{max} ; para comprimentos inferiores a este, o mesmo é dado pela expressão (10). Tal comportamento corresponde àquele observado na figura 6, com exceção da ligeira diferença observada no valor de I_{max} para os diferentes tempos de subida, o que não era esperado. Vale ressaltar que, conforme será visto adiante, a expressão (10) só tem validade se o motor estiver desaterrado. Caso contrário, para pequenos comprimentos de cabo, a corrente de terra é fundamentalmente dependente do motor, não tendo sido desenvolvida aqui uma fórmula para a sua determinação; no caso de comprimentos maiores, a corrente sempre terá amplitude igual a I_{max} , não mais dependendo, portanto, do motor. Tal questão será abordada na subseção “C”.

O procedimento de cálculo dado pelas expressões (1) – (10) é bastante simples e útil para uma estimativa preliminar e aproximada das sobretensões transitórias e correntes de modo comum. As informações provenientes desses cálculos poderão ser suficientes para a sua determinação ou para indicar a necessidade de um estudo mais elaborado, a partir de simulações computacionais. Tal seqüência de cálculos encontra-se ilustrada no diagrama da figura 7. Vale ressaltar que, nas formulações e simulações apresentadas neste trabalho, não foram incluídos, no circuito de seqüência zero, o transformador e as capacitâncias parasitas existentes no sistema, que também compõem tal circuito. Assim, sugere-se como trabalhos futuros a modelagem destes elementos (apropriada para altas freqüências) e o estudo de sua influência nos resultados relativos às correntes de modo comum.

Ao longo de suas sucessivas viagens pelo cabo, os pulsos sofrem amortecimento/distorções, “suavizando” suas bordas e rampa de crescimento. Isto, juntamente ao fato da impedância terminal apresentar elementos reativos, altera o perfil das oscilações das tensões e correntes, gerando erros nos cálculos advindos das expressões apresentadas. Além disso, a velocidade de propagação se altera com a freqüência, especialmente a do modo de seqüência zero, embora um va -

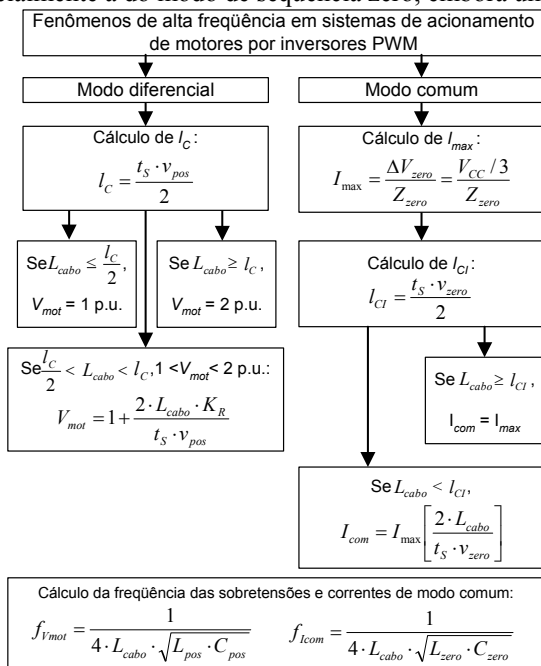


Fig. 7: Procedimento para o cálculo aproximado das grandezas de alta freqüência em estudo.

lor específico deva ser escolhido para ser utilizado nas equações, o que também constitui uma fonte de erro. A título de informação, são mostradas na tabela I as faixas de erro obtidas a partir das expressões apresentadas, tendo como referência os valores simulados, para os arranjos, tempos de subida e comprimentos de cabo analisados. As velocidades de propagação utilizadas correspondem às médias dos valores calculados nas freqüências de 100 kHz e 3 MHz.

C. Influência das características do cabeamento

As características dos cabos analisados, além de sua disposição e forma de instalação, já foram detalhadas na seção II. Observa-se que, no caso do arranjo triangular, a velocidade de propagação do modo de seqüência positiva é significativamente maior ($v_{pos} = 1,78 \times 10^8$ m/s (planar) vs. $2,23 \times 10^8$ m/s (triangular), ambas em 1 MHz), o que eleva o comprimento crítico e faz com que, para um mesmo comprimento de cabo, as sobretensões se reduzam. Isto é tanto mais pronunciado quanto maior for o tempo de subida do pulso, conforme se verifica na figura 8. Vale ressaltar que, conforme afirmado em [19], reduções de 5 a 10 % nos picos das oscilações de tensão podem conduzir a significativos aumentos na vida útil de motores de isolamento tradicional, quando sujeitos às sobretensões.

A influência do arranjo dos cabos na amplitude das correntes de modo comum pode ser verificada na figura 9. Observa-se que a corrente de retorno pela terra é quase 50 % maior no caso do arranjo planar. Todos os prejuízos advindos da circulação dessa corrente já foram detalhados na seção I, e serão tanto mais severos quanto maior for o número de motores sendo acionados por inversores numa dada instalação.

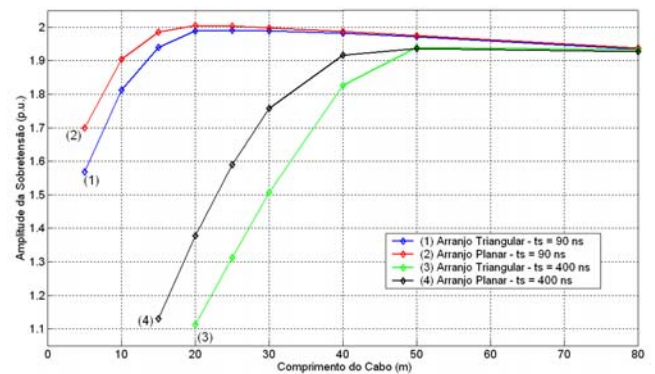


Fig. 8: Amplitude das sobretensões para os arranjos planar e triangular, para dois diferentes tempos de subida.

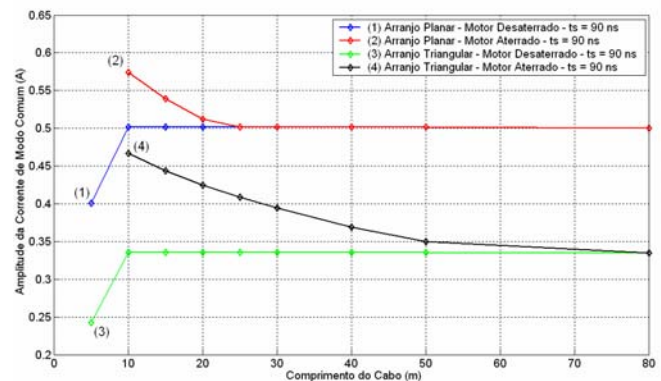


Fig. 9: Valores da corrente de modo comum para os arranjos planar e triangular, com motor aterrado e não-aterrado.

TABELA I

Erros provenientes da utilização das expressões apresentadas comparativamente aos resultados simulados

Gravidade	I_c	I_{c1}	V_{mot}	I_{max}	I_{com}	f_{Vmot} f_{Icom}
Erro (%)	3 - 22	6 - 40	0 - 25	1 - 13	3 - 25	1 - 8

D. Influência do aterramento do motor nas correntes de modo comum

A contribuição do motor no nível das correntes de terra pode ser verificada através das figuras 9 e 10. Observa-se que, no caso de cabos curtos, a corrente de terra depende fortemente do aterramento do motor, ultrapassando o valor calculado pela expressão (8). Nota-se que tal influência é tanto mais pronunciada quanto menor for o tempo de subida. No caso de cabos suficientemente extensos, as correntes não mais dependem do motor, sendo tal comprimento função do tempo de subida do pulso. A partir deste ponto, a sua amplitude volta a ser determinada por (8), conforme mostram as figuras 9 e 10. Assim, ao contrário do que ocorre com as sobretensões, no que concerne às correntes de modo comum, quanto menor for o cabo maior será a sua intensidade, uma vez que, na prática, o motor sempre encontrar-se-á aterrado.

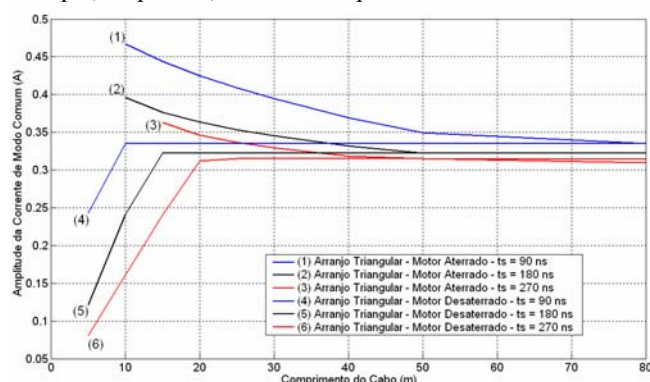


Fig. 10: Amplitude das correntes de modo comum para o caso do motor aterrado e não-aterrado, para diferentes tempos de subida.

E. Cabo com diferentes materiais isolantes

A substituição do EPR pelo PVC na isolamento do cabo pouco influencia o valor das capacitâncias de seqüência positiva e zero, pelo menos no que tange os arranjos estudados nesse trabalho. Dessa forma, as velocidades de propagação e as impedâncias características dos modos praticamente não se alteram. Assim sendo, a utilização de cabos com diferentes materiais isolantes não implica em alterações significativas nas sobretensões transitórias e correntes de modo comum.

IV. CONCLUSÕES

Neste trabalho, diferentes aspectos relativos às sobretensões transitórias e correntes de modo comum em sistemas de acionamento de motores por inversores foram analisados, esclarecendo pontos pouco explorados na literatura. Como principais conclusões, pode-se citar: i) a amplitude das correntes de modo comum é maior para menores tempos de subida e maiores comprimentos de cabo, até certo ponto; daí em diante, esta não mais depende de ambos; ii) o comprimento de cabo no qual isso ocorre foi definido, juntamente a outras expressões que permitem o cálculo da amplitude e frequência dessas correntes; iii) a disposição dos cabos em

arranjo planar resulta em maiores sobretensões no motor e conduz a um acréscimo de cerca de 50 % na circulação das correntes de terra; iv) a substituição do PVC pelo EPR não implica em benefícios no que diz respeito aos fenômenos estudados; v) não existe acréscimo nas correntes de terra devido à contribuição do motor no caso de cabos de maior comprimento, sendo que a definição deste tamanho depende do tempo de subida do pulso; vi) com relação às correntes de terra, quanto menor o comprimento do cabo, maior será a amplitude das mesmas, estando o motor aterrado.

AGRADECIMENTO

À Fapemig, pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

- [1] J. M. D. Murphy, F. G. Turnbull, *Power Electronic Control of AC Motors*, Pergamon Press, Second Edition, 1989.
- [2] R. J. Kerkman, "Twenty Years of PWM AC Drives: When Secondary Issues Become Primary Concerns", *IEEE 22^o IECON*, vol. 1, pp. LVII-LXIII, August 1996.
- [3] L. A. Saunders, G. L. Skibinski, S. T. Evon and D. L. Kempkes, "Riding the Reflected Wave – IGBT Drive Technology Demands New Motor and Cable Considerations", *IEEE 43rd IAS Annual Meeting*, pp. 75-84, September 1996.
- [4] R. J. Kerkman, D. Leggate, G. L. Skibinski, "Interaction of drive modulation and cable parameters on AC motor transients", *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 33, n. 3, pp. 722-731, 1997.
- [5] M. Fenger, S. R. Campbell and J. Pedersen, "Dealing with Motor Winding Problems Caused by Inverter Drives", *IEEE 44th IAS Annual Meeting*, pp. 65-76, May 2002.
- [6] D. Leggate, J. Pankau, D. Schlegel, R. J. Kerkman, G. L. Skibinski, "Reflected Waves and Their Associated Current", *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 33, n. 6, pp. 1383-1392, 1999.
- [7] M. F. Rahman *et al.*, "Modelling and Experimental Studies of Effects of Steep Fronted Inverter Waveforms on Motor and Supply Cabling and Their Remedies", *IEEE Intern. Conference on Power Electronics and Drive Systems*, vol. 1, pp. 519-524, 1999.
- [8] S. Suwankawin *et al.*, "Destruction by Charge Current and Its Solution for PWM Inverter Feeding Multiple Motors Through Long Cables", *IEEE 40^o IAS Annual Meeting*, pp. 1382-1389, 2005.
- [9] A. V. Jouanne *et al.*, "An Evaluation of Mitigation Techniques for Bearing Currents, EMI and Overvoltages in ASD Applications", *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 34, n. 5, pp. 1113-1122, 1998.
- [10] A. F. Moreira, T. A. Lipo, G. Venkataranaman, S. Bernet, "High Frequency Modeling for Cable and Induction Motor Over-Voltage Studies in Long Cable Drives", *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 38, pp. 1297-1306, 2002.
- [11] A. C. S. Lima, R. M. Stephan and A. L. Costa, "Comparison of Overvoltage Mitigation Methods in Industrial Drives with Long Cables", *IEEE Intern. Symposium on Industrial Electronics*, 2003.
- [12] H. de Paula, D. A. Andrade, M. L. Chaves, J. L. Domingos, M. A. A. Freitas, "Methodology for Cable Modeling and Simulation for High-Frequency Phenomena Studies in PWM Motor Drives", *IEEE Trans. on Power Electronics*, a ser publicado (previsão: Março de 2008).
- [13] H. de Paula, M. L. Chaves, A. F. Moreira, T. F. Milagres, M. V. C. Lisboa e J. F. R. Guilherme, "Experimental Investigation of Converter-to-Motor Cabling Influence on Transient Overvoltages and Common Mode currents", *COBEP*, pp. 59-64, 2007.
- [14] Braskem Petroquímica, www2.braskem.com.br (produtos → boletins técnicos → Propriedade de ref. dos compostos PVC).
- [15] G. Skibinski, D. Leggate and R. Kerkman, "Cable Characteristics and Their Influence on Motor Overvoltages", *IEEE 12th APEC*, vol. 1, pp. 114-121, February 1997.
- [16] W. H. Hayt, *Engineering Electromagnetics*, 5^o edição, editora McGraw-Hill, Singapura.
- [17] A. V. Jouanne, P. N. Enjeti, "Design Considerations for an Inverter Output Filter to Mitigate the Effects of Long Motor Leads in ASD Applications", *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 33, n. 5, pp. 1138 – 1145, 1997.
- [18] A. Greenwood, *Electrical Transients in Power Systems*, 2nd edition. New York: Wiley, 1991.
- [19] E. J. Bulington, S. Abney, G. L. Skibinski, "Cable Alternatives for PWM Motor Drive Applications", *IEEE 46th PCICON*, 1999.

BIOGRAFIAS

Hélder de Paula, nascido em Dezembro de 1975, graduou-se em Engenharia Elétrica, com ênfase em Sistemas de Potência, em 1998, na Universidade Federal de Uberlândia (UFU). Obteve os títulos de mestrado e doutorado pela mesma instituição, em 2001 e 2005, respectivamente. Atualmente é professor adjunto do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) e membro do LAI – Laboratório de Aplicações Industriais, deste mesmo departamento. Suas áreas de maior interesse são: acionamento de máquinas elétricas, transitórios e compatibilidade eletromagnética e qualidade da energia.

Marcus Vinicius Cordeiro Lisboa, nascido em Julho de 1986, ingressou na UFMG em 2005 e cursa atualmente o 6º período do curso de Engenharia Elétrica, com ênfase em Sistemas de Energia e Controle de Processos. No momento, é bolsista do Programa de Educação Tutorial (PET), participando de atividades de pesquisa na área de fenômenos de alta frequência em sistemas de acionamento.

Jonathas Berilo F. R. Guilherme, nascido em Junho de 1985, ingressou na UFMG em 2005, cursando atualmente o 6º período do curso de Engenharia

Elétrica, com ênfase em Sistemas de Energia. No momento, é bolsista de iniciação científica (Fapemig) e trabalha em um projeto de pesquisa na área fenômenos de alta frequência em sistemas de acionamento.

Wallace do Couto Boaventura nasceu em 1965. Graduou-se e obteve o título de Mestre pela UFMG em 1987 e 1990, respectivamente, e obteve o título de Doutor em 2002 pela Universidade Estadual de Campinas, SP / University of Toronto, Canadá. É professor da UFMG desde 1992. Suas áreas de interesse incluem transitórios eletromagnéticos, aplicações de processamento de sinais em sistemas de energia, compatibilidade eletromagnética e engenharia de alta tensão.

Marcelo Lynce Ribeiro Chaves nasceu em Outubro de 1951. Graduou-se em Engenharia Elétrica pela UFU em 1975. Recebeu o diploma de mestre em 1985, pela UFU, e o de doutor em 1995, pela UNICAMP. Atualmente é professor titular na Faculdade de Engenharia Elétrica da UFU. Suas linhas de pesquisa são principalmente: acionamentos elétricos, transitórios eletromagnéticos e modelagem de transformadores.