

ANÁLISE E DISCUSSÃO DAS CORRENTES PARASITAS DE ALTA FREQUÊNCIA NO INTERIOR DO MOTOR DE INDUÇÃO

MARCO T. A. ÊVO

Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de São João del Rei
Praça Frei Orlando 170, sala 2.06 – Centro, São João del Rei – MG, 36307-352
mtevo@ufsj.edu

HÉLDER DE PAULA

Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia
Av. João Naves de Ávila, 2121 - Bloco 1E - Santa Mônica, Uberlândia - MG, 38400-902
drhelderdepaula@gmail.com

Abstract— With a didactic and clear approach, this work presents a detailed description of the high frequency parasitic currents inside an induction motor in a converter fed operation. For each current type, its physical mechanisms, expected magnitudes, circulation paths and associated problems are discussed. In addition, computational results using the finite element method (FEM) are shown about the use of electrostatic shields to attenuate these currents.

Keywords— High Frequency Current, Bearing Current, Common Mode Current, Finite Element Method, Electrostatic Shield

Resumo— Através de uma abordagem didática e clara, este trabalho apresenta uma descrição detalhada das correntes parasitas de alta frequência que fluem no interior de uma máquina de indução acionada por conversor de frequência. São discutidos os seus mecanismos físicos, magnitudes esperadas, caminhos de circulação e problemas associados a cada um dos tipos dessas correntes. Além disso, empregando-se simulações baseadas em Análise de Elementos Finitos, é mostrada a atenuação possível de ser obtida destas correntes quando blindagens eletrostáticas específicas para esta finalidade são aplicadas no interior da máquina.

Palavras-chave— Correntes parasita de alta frequência, Corrente de rolamento, Corrente de modo comum, Método dos elementos Finitos, Blindagem eletrostática

1 Introdução

Historicamente, a busca por acionamentos mais eficientes culminou no surgimento de chaves com tempos de comutação cada vez mais rápidos, capazes de aplicar, nas máquinas rotativas, pulsos de tensões com tempos de subida extremamente curtos (70 a 100ns) e, conseqüentemente, submetendo seus enrolamentos a elevadíssimas variações de tensão, da ordem de vários kV/ μ s. Assim, diversos fenômenos danosos à operação e vida útil das máquinas foram identificados nas últimas décadas, relacionados à presença desses elevados dv/dts, dentre os quais pode-se destacar: (i) Sobretensões transitórias nos terminais do motor, além da sua distribuição não linear ao longo da bobina (Persson, 1992), (Paula et al., 2009) e (Moreira, 2002); (ii) Correntes parasitas de alta frequência. Para o item (i), o maior malefício diz respeito a possíveis falhas de isolamento devido ao estresse dielétrico repetitivo que esses fenômenos impõem aos enrolamentos. Em relação a (ii), de acordo com a maneira que são geradas e com os seus caminhos de circulação, as correntes parasitas de alta frequência podem ser classificadas de formas distintas e gerar diferentes tipos de problemas no sistema de acionamento. Assim, são consideradas como integrantes desse grupo, as correntes: (1) de carga nos cabos (Suwankawin et al., 2005) e (Paula et al., 2014); (2) de retorno pelo terra (Muetze and Binder, 2005) e (Paula et al., 2014); (3) internas ao

motor (Muetze, 2004), (Araújo et al., 2015) e (Oliver, Guerrero and Goldman, 2017).

Em cada chaveamento da tensão entre fases, todas as capacitâncias mútuas distribuídas ao longo dos cabos são carregadas ou descarregadas. Nesse contexto, as correntes oscilatórias de modo diferencial geradas podem causar diversos problemas, como atuações indevidas de relés de proteção de sobrecorrente do conversor, sobreaquecimento e destruição das capacitâncias snuber da ponte inversora ou mesmo erro de medições de corrente para fins de realimentação (Leggate et al., 1999), (Suwankawin et al., 2005) e (Rahman et al., 1999). De maneira semelhante, as variações da tensão de modo comum produzida pela ponte inversora excitam os acoplamentos capacitivos distribuídos entre partes do motor, cabo e conversor para a terra, promovendo a circulação de correntes de alta frequência pelo condutor de retorno. Essa corrente pode causar problemas de interferências eletromagnética, além de atuações indevidas de relés de proteção contra faltas para o terra (Jouanne, Zhang and Wallace, 1998). Por fim, além de contribuírem para a corrente total de retorno pelo terra, correntes parasitas de alta frequência que são geradas no interior do motor também podem causar sérios danos aos rolamentos da máquina e/ou da carga acionada (Araújo et al., 2015) e (Oliver, Guerrero and Goldman, 2017).

Nesse contexto, embora a origem de todas as correntes internas à máquina esteja relacionada aos elevados dv/dts impostos pela tensão de modo comum, há várias questões e aspectos particulares carentes de

maiores esclarecimentos, como os mecanismos relacionados à sua circulação. Nesse contexto, o objetivo deste trabalho consiste em apresentar uma descrição detalhada sobre cada uma das correntes de alta frequência presentes no interior da máquina, de forma criteriosa e através de uma abordagem didática, contribuindo para a compreensão do tema. Além disso, são mostrados também resultados sobre a utilização de blindagens eletrostáticas para a mitigação dessas correntes, aplicadas ao estator da máquina, obtidos através de simulações por meio de Análise de Elementos Finitos.

2 Correntes parasitas de alta frequência

2.1 Acoplamentos internos ao motor

Considerando a máquina de indução, sabe-se que as capacitâncias distribuídas entre o enrolamento do estator e o seu núcleo/carcaça (C_{wf}), entre o enrolamento e o rotor (C_{wr}) e entre a carcaça e o rotor (C_{rf}), constituem os principais caminhos para correntes de deslocamento excitadas pelas tensões de modo comum. Além disso, o acoplamento entre o rotor e a carcaça pode ocorrer de duas maneiras: através do próprio entreferro da máquina (C_{rf}'), ou ainda, por meio dos rolamentos (C_b).

Seja por meio de cálculos (analíticos e/ou numéricos) ou por medições experimentais, diversos trabalhos propõem valores típicos para as capacitâncias distribuídas no interior da máquina (Muetze, 2004) (Busse et al., 1997c) e (Magdun, Gemeinder and Binder, 2010b). Assim, dentre todas, a capacitância entre o enrolamento do estator e a carcaça é predominante e varia, geralmente, entre algumas unidades até diversas dezenas de nF, dependendo do porte da máquina. De maneira semelhante, a capacitância entre o rotor e o estator também atinge valores relativamente elevados, da ordem de unidades de nF. Por outro lado, o acoplamento eletrostático entre os enrolamentos e o rotor é extremamente fraco, ou seja, o valor de C_{wr} é bastante pequeno quando comparado com as duas capacitâncias anteriores, variando de dezenas até centenas de pF. Da mesma forma, a capacitância dos rolamentos, constituída entre as suas pistas e esferas e tendo a graxa lubrificante como dielétrico, é pequena e está compreendida na mesma ordem de grandeza de C_{wr} .

Ainda com relação aos acoplamentos representados pelas capacitâncias C_{wf} , C_{rf} e C_{wr} , tem-se que os mesmos crescem com o tamanho da máquina. Ou seja, para dimensões mais elevadas, maiores são também as áreas dos condutores e demais partes envolvidas nesses acoplamentos, aumentando, portanto, os valores dessas capacitâncias (Busse et al., 1997b). Por outro lado, no tocante à capacitância dos rolamentos, tem-se que, devido a alterações nos espaços internos deste componente, a mesma se reduz com o porte da máquina (Busse et al., 1997b).

Por fim, é importante observar que, embora os acoplamentos capacitivos tenham importância funda-

mental no comportamento do motor em alta frequência, as indutâncias e resistências distribuídas ao longo das bobinas, núcleo e carcaça também exercem influência em sua impedância total (Asefi and Nazarzadeh, 2017).

2.2 Corrente entre os enrolamentos e a carcaça

Como o maior acoplamento capacitivo da máquina se dá entre a seu núcleo/carcaça e os enrolamentos do estator, o percurso formado pelos enrolamentos e núcleo do estator é o que predomina dentre todos os caminhos possíveis para a circulação de correntes de alta frequência. Este trajeto é ilustrado na parte em azul (I_{wf}) da Figura 1. Nessa situação, estando a carcaça devidamente aterrada (Z_{fg} de baixo valor) a cada dv/dt da tensão de modo comum, praticamente toda a corrente que retorna para o terra (oriunda das partes internas da máquina) circula por esse caminho.

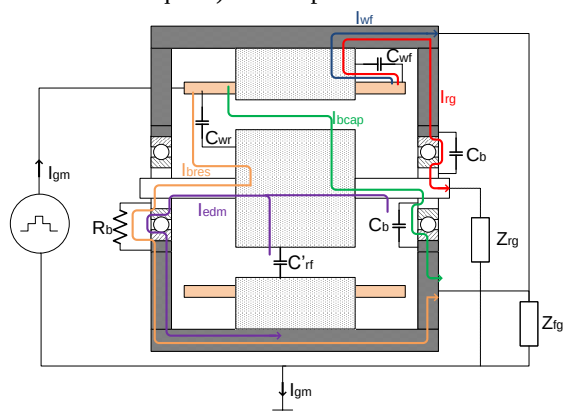


Figura 1. Caminhos internos para as correntes de alta frequência. Adaptado de (Asefi and Nazarzadeh, 2017).

Assim, embora tenha influência primordial para outros fenômenos, como, por exemplo, para as correntes de descarga (ver seção 2.3.1), a contribuição do rotor para a corrente de modo comum pode ser considerada desprezível. Dessa maneira, muitas vezes na literatura não é realizada uma distinção entre a corrente que retorna pelo terra I_{gm} e I_{wf} , denominando ambas simplesmente como corrente de modo comum do motor. Como C_{wf} está diretamente ligada ao tamanho da máquina, tem-se que essas correntes podem assumir valores de pico distintos, sendo encontrado na literatura desde algumas unidades até algumas dezenas de Ampères (de pico), dependendo da potência do motor (Binder and Muetze, 2008). Além disso, as frequências dessas correntes estão tipicamente na faixa de algumas centenas de kHz até alguns MHz (Binder and Muetze, 2008).

Antes de atingir o ponto aterrado na carcaça, a corrente I_{wf} percorre um caminho extremamente complexo pelo núcleo do estator. Diferentemente do que se pode imaginar em uma primeira análise e também da interpretação de muitos textos sobre tal corrente, ao percorrer as chapas do núcleo, essa corrente não segue diretamente pela carcaça até o ponto aterrado, mas faz uma espécie de “zig zag”, “saltando” de uma chapa para a outra. Para compreender melhor esse trajeto, a Figura 2 ilustra a vista lateral do motor, destacando duas laminações do seu núcleo.

possui níveis bem reduzidos, compreendidos na faixa de unidades mA (Muetze and Binder, 2007c). Portanto, essa corrente normalmente não é foco de preocupação, uma vez que pode ser considerada inofensiva para os rolamentos.

Por outro lado, sobretudo para velocidades muito reduzidas (abaixo de 10 % da nominal) e/ou temperaturas muito elevadas, a espessura da película lubrificante torna-se extremamente delgada, permitindo que haja uma grande área de contato quase metálico entre as rugosidades das esferas e das pistas dos rolamentos. Nesse caso, os rolamentos se comportam basicamente como uma resistência elétrica de baixo valor ôhmico, tornando possível que uma corrente resistiva flua através dos mesmos sem elevações consideráveis em sua tensão ($Z_b = R_b \approx 0$) (Mäki-Ontto, 2006). Essa corrente é ilustrada pela linha laranja (I_{bres}) da Figura 1. Além disso, uma vez que essa corrente só existe nos momentos em que o acoplamento C_{wr} se encontra excitado, ela também ocorre em sincronismo com os dv/dts da tensão de modo comum. Ainda, como relatado em (Muetze and Binder, 2007c), as correntes resistivas podem atingir intensidades de até algumas centenas de mA e, assim como as capacitivas, geralmente não apresentam perigo para os rolamentos. Em alguns trabalhos, as correntes resistivas são denominadas como de condução (Chen, Lipo and Fitzgerald, 1996) e, por vezes, não é realizada uma distinção em relação às correntes capacitivas.

B - Corrente de descarga (EDM)

As correntes de descarga (EDM) são observadas quando os rolamentos mantêm, por algum período, características capacitivas e, subitamente, assumem propriedades de bons condutores. Isso pode ocorrer de duas formas. Na primeira delas, se as cargas eletrostáticas que vão sendo induzidas no eixo da máquina ao longo das variações da tensão de modo comum (devido ao acoplamento capacitivo entre eixo/rotor e os enrolamentos do estator) resultarem num potencial acima do limite suportável pela graxa lubrificante, ocorre uma ruptura elétrica em seu interior. Nessa situação, o comportamento elétrico do rolamento torna-se basicamente resistiva, com valores na faixa de alguns ohms (Muetze, 2004). Portanto, toda a carga acumulada no eixo da máquina se descarrega através do rolamento que teve o lubrificante corrompido, como ilustrado na linha em roxo (I_{edm}) da Figura 1. Contudo, há uma outra maneira pela qual a descarga pode ocorrer mesmo antes da tensão atingir tal valor limiar. Eventualmente, durante a operação da máquina, podem ocorrer pontos de contato quase metálicos entre as esferas e as pistas, que se sucedem de maneira aleatória, durante a rotação da máquina. Quando isso acontece, a carga eletrostática instantânea acumulada no eixo/rotor da máquina descarrega-se para a sua carcaça aterrada, gerando correntes de descarga semelhantes às explicadas anteriormente, mas com menor intensidade (Busse et al., 1997a). Além disso, como a espessura da película lubrificante depende de uma sé-

rie de fatores (velocidade, temperatura, tensão mecânica sobre o rolamento decorrente da carga aplicada, etc), o valor da tensão de ruptura não é constante durante a operação do motor. Por estas razões, normalmente as descargas ocorrem de forma aleatória e não estão em sincronismo com os dv/dts da tensão de modo comum (Chen, Lipo and Fitzgerald, 1996).

A ocorrência das descargas elétricas pode submeter os rolamentos a pulsos de correntes elevados, situados na faixa de centenas de mA até algumas unidades de ampères (Muetze and Binder, 2007c) e (Almeida et al., 2012) que podem oscilar em frequências de até alguns MHz (Muetze, 2004). Assim, ao contrário das correntes capacitivas/resistivas, normalmente essas descargas são bastante preocupantes, uma vez que podem causar sérios danos aos rolamentos, tal como no caso real reportado em (Araújo et al., 2015). Ainda, conforme discutido em (Binder and Muetze, 2008), as amplitudes das EDM são relativamente independentes do tamanho do motor. Assim, as máquinas menores estão expostas a maiores riscos, uma vez que seus rolamentos são sujeitos a densidades de corrente de descarga mais elevadas, já que a área de contato entre as suas (menores) esferas e pistas é mais reduzida. Além disso, para motores de grande porte (acima de 100 kW), as correntes circulantes de alta frequência se tornam mais relevantes (Binder and Muetze, 2008), conforme discutido na Seção 2.3.2.

As manifestações mais severas desse fenômeno não são esperadas para velocidades nem muito abaixo nem muito acima da nominal (Binder and Muetze, 2008). Ou seja, para velocidades reduzidas, há a um maior contato quase metálico entre as superfícies rugosas das esferas e pistas e os rolamentos se comportam praticamente como curto. Assim, o eixo da máquina permanece praticamente aterrado, de forma a sua tensão não é capaz de se elevar suficientemente para que ocorra a ruptura do lubrificante. Por outro lado, para velocidades muito altas, pelo menos três eventos podem contribuir para redução das descargas. Primeiro, tem-se que, estatisticamente, o tempo médio para que ocorra um ponto de contato diminui à medida que a velocidade aumenta. Assim, para um número de rotações por minuto muito elevado, a sucessiva ocorrência desses contatos também não permite o crescimento exacerbado da tensão nos rolamentos (Muetze, 2004). Já em (Magdun, Gemeinder and Binder, 2010a) é destacado que, como a película lubrificante possui espessura maior para velocidades elevadas, isso leva a maiores valores para a resistência equivalente do rolamento durante a descarga, o que reduz a amplitude dessa corrente. Além disso, em (Gemeinder et al., 2014) é comentado que o aumento da espessura da graxa pode fazer com que a tensão no rolamento não atinja o valor limite para a ruptura. Diante do exposto, existe um valor intermediário de velocidade situado próximo à nominal, para que as correntes de descargas aconteçam de forma mais severa. Contudo, à medida que a temperatura aumenta, o ponto em que ocorrem as descargas mais intensas é deslocado para velocidades maiores (Binder and Muetze, 2008). Isso

porque, como a espessura do filme lubrificante diminui com a temperatura, após certo aquecimento é possível retomar a espessura que permita a tensão no rolamento alcançar os valores críticos e, consequentemente, as descargas mais severas, elevando-se a velocidade de rotação.

Tipicamente, o campo elétrico máximo que a graxa suporta se encontra na faixa de 15 V/μm. Assim, considerando as espessuras normalmente empregadas para os rolamentos de esferas (de 0,2 a 2 μm), a tensão de ruptura se encontra na faixa de 3 a 30 V (Busse et al., 1997d). Considerando que o rolamento se encontra com comportamento capacitivo, a razão entre sua tensão e a de modo comum pode ser calculada a partir do circuito da Figura 3, como mostrado na Eq. (1). Essa relação é denominada “razão de tensão no rolamento” ou BVR (*Bearing Voltage Ratio*) (Busse et al., 1997a). Como geralmente a capacitância C_{wr} é pequena, normalmente essa razão apresenta valores baixos, sendo tipicamente menores do que 10% (Muetze and Binder, 2007b). No entanto, como os valores da tensão de modo comum são governados pelo barramento CC (normalmente dado por centenas de volts), mesmo com os baixos valores do BVR, em muitos casos a tensão nos rolamentos pode atingir facilmente os limites suportáveis pela graxa.

$$BVR = \frac{C_{wr}}{C_{wr} + C_{rf} + 2C_b} \quad (1)$$

2.3.2 Correntes circulantes

As correntes circulantes possuem um mecanismo de geração diferente daquele discutido nas seções anteriores. Sua ocorrência está diretamente ligada a um fluxo de alta frequência disperso gerado pelas correntes I_{wf} . Dessa forma, tem-se que a compreensão acerca da geração desse fluxo e do caminho percorrido pelas correntes circulantes são pontos essenciais para o entendimento do fenômeno.

De maneira pioneira, (Chen and Lipo, 1998) aponta a existência das correntes circulantes. Embora tal trabalho possa auxiliar na compreensão do fenômeno, os trabalhos mostrados em (Mäki-Ontto and Luomi, 2005) e (Muetze and Binder, 2007a) trazem uma abordagem que ilustra de forma mais detalhada a geração do fluxo de alta frequência, descrevendo como o caminho da corrente I_{wf} influencia nesse processo. Observando o trajeto em “zig zag” da corrente I_{wf} (Seção 2.2), é possível notar que, ao percorrer as lâminas, as componentes de I_{wf} geram um fluxo de alta frequência disperso que circunda as chapas do núcleo do estator (sobretudo na região do *Yoke*), como mostrado na Figura 4. Assim, como esse fluxo enlaça o eixo da máquina, uma tensão entre suas extremidades é induzida, por ação de transformação. Portanto, caso os rolamentos se comportem como bons condutores, uma corrente elétrica (I_{cir}) flui no circuito formado pelos rolamentos, tampas laterais, carcaça, eixo e pacotes magnéticos do estator e rotor, como ilustrado na Figura 5.

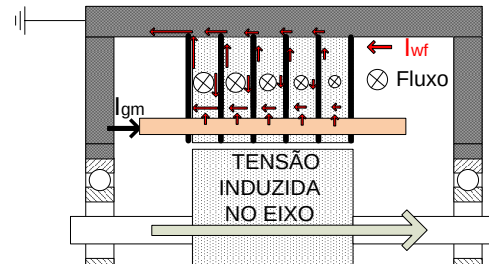


Figura 4. Fluxo de alta frequência e da tensão induzida no eixo.

Uma vez que quanto mais próximo do ponto aterrado, maior é a densidade de corrente no núcleo, mais intenso é também o fluxo gerado nessa região. Isso é ilustrado pelo tamanho dos círculos na Figura 4.

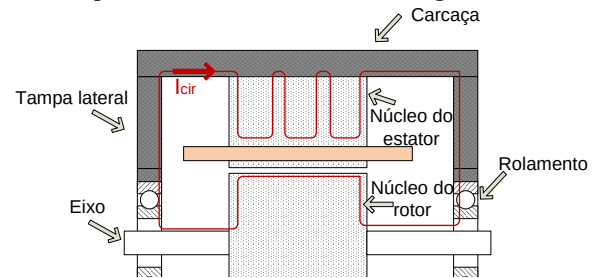


Figura 5. Trajeto da corrente circulante

Na região do núcleo do estator, as correntes circulantes compartilham do mesmo complexo trajeto em “zig zag” das correntes que fluem dos enrolamentos para a carcaça (Magdun, Gemeinder and Binder, 2013). No entanto, nenhuma parcela é oriunda dos enrolamentos. Por outro lado, no pacote magnético do rotor, tais correntes se distribuem na região mais externa, nas proximidades do entreferro. Isso porque, nesse local, existe um caminho condutivo entre as chapas adjacentes devido a uma espécie de polimento (*re-surfacing*) do rotor em gaiola para ajustá-lo ao entreferro (Magdun, Gemeinder and Binder, 2013). Nas outras regiões metálicas, a corrente circulante se distribui pelas suas superfícies (Boucenna et al., 2013).

Sob o ponto de vista elétrico, cada uma das partes mostradas na Figura 5 introduz suas indutâncias e resistências no percurso das correntes circulantes e podem, em maior ou menor escala, influenciar na sua intensidade. Nesse ponto há certa divergência nos trabalhos sobre a importância que cada elemento possui na composição da impedância total dos caminhos das correntes circulantes. Em (Muetze and Binder, 2007a), são consideradas como relevantes a região do núcleo do estator (indutâncias interna, externa e resistência) e as indutâncias externas referente às partes fora ao núcleo. Assim, as contribuições das indutâncias internas e das resistências das regiões fora do pacote magnético do estator são ignoradas. De maneira semelhante, em (Mäki-Ontto and Luomi, 2005) a impedância do núcleo do estator também é levada em consideração no circuito das correntes circulantes. Por outro lado, é comentado que esse circuito também inclui as impedâncias dos rolamentos, do rotor e das tampas laterais. No entanto, não fica claro qual a real contribuição de cada uma das partes, uma vez que elas

são inseridas em um único elemento. Entretanto, em (Magdun, Gemeinder and Binder, 2013) é mostrado que a impedância do rotor tem papel muito importante na composição do circuito das correntes circulantes, podendo chegar a ter o mesmo valor daquele apresentado pelo núcleo do estator.

As correntes circulantes podem atingir valores de pico superiores àqueles encontrados nas EDM, variando de algumas centenas de mA até dezenas de Amperes (Muetze and Binder, 2007c). Além disso, como mostrado em (Muetze and Binder, 2007a), tanto o fluxo de modo comum como a tensão induzida aumentam com o tamanho do motor. Assim, esse tipo de corrente é mais esperado para máquinas de grande porte, nas quais as tensões induzidas no eixo superam facilmente o valor limite suportável pela graxa. Portanto, devido aos valores de pico elevados que podem alcançar, densidades de correntes potencialmente perigosas aos rolamentos podem ocorrer (Binder and Muetze, 2008).

Posto que as correntes circulantes são induzidas pelo fluxo de alta frequência que enlaça o eixo, elas se “espelham” na forma de onda das correntes que fluem do enrolamento para a carcaça. Portanto, elas ocorrem em sincronismo com os dv/dts da tensão de modo comum. A razão de transformação entre essas correntes pode ser prevista por meio da relação entre as impedâncias de seus trajetos. Assim, segundo (Muetze and Binder, 2007a), teoricamente a corrente circulante pode alcançar no máximo um valor de pico igual a 35,4 % da corrente que a gera. Contudo, em (Magdun, Gemeinder and Binder, 2013), foram medidos valores entre 0,5 a 0,9 para essa relação. Isso é explicada pelo fato de que, para as frequências de oscilações das correntes circulantes observadas (0,7 a 1,7 MHz), algumas considerações tomadas na modelagem em (Muetze and Binder, 2007a) não são satisfeitas.

3 Modelagem do motor de indução adequada para os fenômenos em foco

Para simular pulsos de tensão nos condutores do estator, a melhor alternativa é se realizar uma análise no domínio do tempo (Henze et al., 2009). Assim, ignorando os efeitos indutivos e considerando que as propriedades dos materiais são contínuas ao longo do espaço, a Eq. (2) descreve o potencial escalar elétrico ao longo de todo o domínio.

$$-\left(\sigma + \varepsilon \frac{\partial}{\partial t}\right) \nabla^2 V = 0 \quad (2)$$

Onde σ é a condutividade e ε a permissividade elétrica do material. Assim, o campo elétrico (E) e a densidade de corrente (J) podem ser calculados para toda a região de interesse, como descrito nas Eq. (3).

$$\begin{aligned} J &= \sigma E + \varepsilon \frac{\partial E}{\partial t} \\ E &= -\nabla V \end{aligned} \quad (3)$$

Dessa maneira, é possível computar todo o fluxo de corrente que ocorre dentro do domínio avaliado. No

presente trabalho, toda a modelagem foi realizada utilizando o *software* Comsol Multiphysics, que realiza os cálculos por meio do método dos elementos finitos, permitindo a análise de problemas com geometrias complexas, como a estudada nesse trabalho.

Para mostrar a aplicabilidade de blindagens eletrostáticas na mitigação das correntes parasitas de alta frequência, foi construído um modelo 2D de um motor de indução, como mostrado na Figura 6. Dois tipos de blindagens foram analisados. Um deles consiste no posicionamento do material condutor entre os enrolamentos do estator e o rotor, o que reduz o acoplamento entre essas duas partes (Ferreira, Cistelean and Almeida, 2012). Por outro lado, o segundo realiza uma alteração no acoplamento enrolamento/carcaça, por meio do alojamento da blindagem entre as bobinas e o núcleo do estator (Mäki-Ontto and Luomi, 2003). Assim, além da disposição original, a Figura 6 traz também detalhes das ranhuras quando na presença das blindagens.

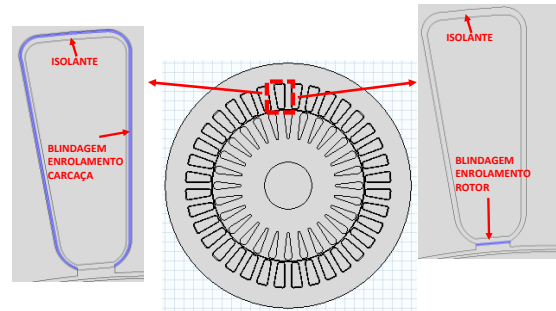


Figura 6. Geometria do motor de indução, em 2D, e blindagens empregadas.

É importante ressaltar que o modelo 2D analisado traz algumas limitações para o problema. Em primeiro lugar, tem-se que, para a máquina de indução com rotor em gaiola, essa condição despreza o acoplamento existente entre as cabeças das bobinas e o anel que conecta as barras do rotor. Além disso, ainda que para as frequências elevadas os acoplamentos capacitivos tenham importância singular, ao se desprezar os efeitos indutivos tem-se um impacto negativo no cálculo da impedância equivalente do motor. Ademais, ao se considerar as bobinas nas ranhuras como um só condutor equivalente, há uma alteração no valor real de C_{wf} . Dessa maneira, com o modelo proposto obtém-se apenas uma aproximação do valor de I_{wf} . No entanto, para os objetivos deste trabalho, predominantemente qualitativos, essa estimativa é satisfatória.

4 Resultados e discussões

Para as simulações, foram aplicados pulsos de tensão na superfície dos condutores alojados no interior das ranhuras. Esses pulsos possuem tempo de subida de 100 ns e variam entre ± 100 V. Assim, a tensão entre eixo e carcaça atingiu um valor máximo de quase 10 V ($BVR \approx 10\%$), o que poderia ocasionar uma descarga nos rolamentos. Para criar o referencial de terra, foi inserido um potencial nulo no núcleo do estator. O MI avaliado é de 4 polos, 2 HP, 36 ranhuras no estator

e 28 no rotor. O comprimento do núcleo é de 100 mm e as blindagens possuem 0,1 mm de espessura.

A Figura 7 ilustra a distribuição da densidade de corrente durante um pulso de tensão com e sem a presença da blindagem entre o enrolamento e o rotor. Dessa forma fica claro como este método atua isolando o rotor. Ou seja, para cada dv/dt da tensão de modo comum, a corrente de modo comum do motor (I_{gm}) flui dos enrolamentos para a carcaça através do núcleo do estator ou da própria blindagem. Assim, para a situação analisada, a presença da blindagem anulou a corrente entre o enrolamento e o rotor. Porém, embora possa garantir uma maior proteção contra as correntes de descarga, como existe também um acoplamento entre o enrolamento e o rotor na região da cabeça das bobinas, dificilmente a blindagem apenas na saída da ranhura apresentaria tamanha atenuação da corrente. Além disso, como essa solução cria um acoplamento direto na saída da ranhura entre os enrolamentos e o terra, tem-se um ligeiro incremento de 6,64 A para 6,98 A na corrente total de modo comum gerada no interior da máquina. Por fim, tem-se que essa blindagem não altera a corrente I_{wf} e, consequentemente, não atua sobre as correntes circulantes.

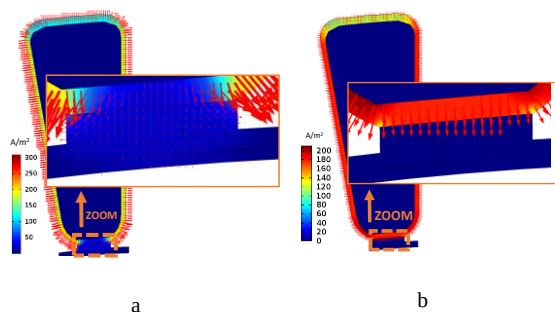


Figura 7. Distribuição da densidade de corrente para: a) Sem a blindagem; b) Com a blindagem.

A Figura 8 ilustra a corrente entre o enrolamento e carcaça durante o primeiro pulso na tensão de modo comum, com e sem a blindagem. Mostra também a distribuição da densidade de corrente na região da ranhura, na presença da blindagem.

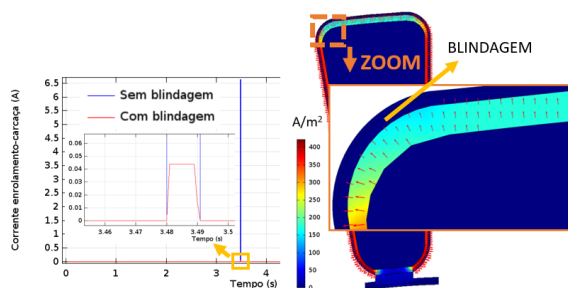


Figura 8. Corrente entre o enrolamento e carcaça com e sem blindagem e distribuição da densidade de corrente com a presença da blindagem.

Dessa forma, fica claro que a corrente I_{wf} não é capaz de adentrar na região das lâminas do estator. Na realidade ela retorna preferencialmente via blindagem

evitando a geração do fluxo de alta frequência e, consequentemente, das correntes circulantes. Assim, para essa situação, há uma redução de 6,64 A para 0,04 A na parcela de corrente que flui pelo núcleo. Contudo, essa configuração de blindagem não altera a corrente I_{wr} . Além disso, devido a uma maior proximidade entre o terra e os condutores nas ranhuras, nessa situação houve um aumento de 2 vezes na corrente total de modo comum I_{gm} . Assim, embora tais simulações apresentem apenas valores aproximados de I_{gm} , fica claro que o posicionamento dessa blindagem pode influenciar de forma considerável o acoplamento entre os enrolamentos e a carcaça aterrada.

4 Conclusões

Este trabalho apresentou uma descrição detalhada das correntes parasitas de alta frequência que fluem no interior de motores acionados por inversores PWM. Para cada tipo de corrente foram discutidos os seus mecanismos físicos, caminhos de circulação, valores típicos e possíveis problemas associados. Com isso, contribuiu-se para um maior esclarecimento e desmitificação sobre o assunto, ao aborda-lo de forma mais didática e acessível. Além disso, foram realizadas simulações computacionais sobre a utilização de dois tipos de blindagens eletrostáticas para a atenuação das correntes de alta frequência nos rolamentos, sendo uma posicionada entre os enrolamentos e o rotor e outra entre os enrolamentos e o núcleo do estator. Ambas mostraram resultados satisfatórios para a redução das correntes nos rolamentos.

É importante destacar que os autores vêm pesquisando o impacto da utilização de diferentes materiais e dimensões geométricas para as blindagens, de forma que o presente trabalho se trata de uma pesquisa em andamento.

Referências Bibliográficas

- Almeida, W.P., Paula, H., Silveira, A.W.F.V. and Araújo, R.S. (2012) 'Contribuições ao Estudo das Correntes de Alta Frequência no Motor de Indução Acionado por Inversor PMW', Conferência Internacional de Aplicações Industriais, Fortaleza.
- Araújo, R. S., Paula, H., Rodrigues, R.d.A., Baccarini, L.M.R. and Rocha, A.V. (2015) 'Premature Wear and Recurring Bearing Failures in an Inverter-Driven Induction Motor—Part I: Investigation of the Problem', *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 51, no. 6, pp. 4861 - 4867.
- Asefi, M. and Nazarzadeh, J. (2017) 'Survey on high-frequency models of PWM electric drives for shaft voltage and bearing current analysis', *IET Electrical Systems in Transportation*, vol. 7, no. 3, pp.179-189.
- Binder, A. and Muetze, A. (2008) 'Scaling Effects of Inverter-Induced Bearing Currents in AC Machines', *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 44, no. 3, pp. 769 - 776.
- Boucenna, N., Hlioui, S., Revol, B. and Costa, F. (2013) 'A detailed analysis of the propagation paths of high-

- frequency common mode currents in AC motors' Conference on Power Electronics and Applications
- Busse, D., Erdman, J., Kerkman, R.J., Schlegel, D. and Skibinski, G. (1997a) 'Bearing currents and their relationship to PWM drives', *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 12, no. 2, pp. 243 - 252.
- Busse, D., Erdman, J., Kerkman, R., Schlegel, D. and Skibinski, G. (1997b) 'Characteristics of shaft voltage and bearing currents', *IEEE Industry Applications Magazine*, vol. 3, no. 6, pp. 21 - 32.
- Busse, D., Erdman, J., Kerkman, R.J., Schlegel, D. and Skibinski, G. (1997c) 'System electrical parameters and their effects on bearing currents', *IEEE on Industry Applications*, vol. 33, no. 2, pp. 577 - 584.
- Busse, D., Erdman, J., Kerkman, R.J., Schlegel, D. and Skibinski, G. (1997d) 'The effects of PWM voltage source inverters on the mechanical performance of rolling bearings', *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 33, no. 2, pp. 567 - 576.
- Chen, S. and Lipo, T.A. (1998) 'Circulating type motor bearing current in inverter drives', *IEEE Industry Applications Magazine*, vol 4, no 1, pp. 32 - 38.
- Chen, S., Lipo, T.A. and Fitzgerald, D. (1996) 'Source of induction motor bearing currents caused by PWM inverters', *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol 11, no 1, pp. 25 - 32.
- Erdman, J.M., Allen Bradley Co., M.W.U., Kerkman, R.J., Schlegel, D.W. and Skibinski, G.L. (1996) 'Effect of PWM inverters on AC motor bearing currents and shaft voltages', *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol 32, no 2, pp. 250 - 259.
- Ferreira, F.J.T.E., Cistelecan, M.V. and Almeida, A.T.d. (2012) 'Evaluation of Slot-Embedded Partial Electrostatic Shield for High-Frequency Bearing Current Mitigation in Inverter-Fed Induction Motors', *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol 27, no 2, pp. 382 - 390.
- Gemeinder, Y., Schuster, M., Radnai, B., Sauer, B. and Binder, A. (2014) 'Calculation and validation of a bearing impedance model for ball bearings and the influence on EDM-currents', (ICEM), Berlin.
- Henze, O., Koch, S., Gersem, H.D. and Weiland, T. (2009) 'A 3D-coil model for bearing current analysis of inverter-fed drives', 13th European Conference on Power Electronics and Applications, Barcelona
- Jouanne, A.v., Zhang, H. and Wallace, A.K. (1998) 'An evaluation of mitigation techniques for bearing currents, EMI and overvoltages in ASD applications', *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 34, no. 5, pp. 1113 - 1122.
- Leggate, D., Pankau, J., Schlegel, D.W., Kerkman, R.J. and Skibinski, G.L. (1999) 'Reflected waves and their associated current', *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 35, no. 6, pp. 1383 - 1392.
- Magdun, O., Gemeinder, Y. and Binder, A. (2010a) 'Investigation of influence of bearing load and bearing temperature on EDM bearing currents', IEEE Energy Conversion Congress and Exposition
- Magdun, O., Gemeinder, Y. and Binder, A. (2010b) 'Prevention of harmful EDM currents in inverter-fed AC machines by use of electrostatic shields in the stator winding overhang', 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society Glendale
- Magdun, O., Gemeinder, Y. and Binder, A. (2013) 'Rotor impedance of the high frequency circulating bearing current path in inverter-fed AC machines', IEEE Energy Conversion Congress and Exposition Denver
- Mäki-Ontto, P. (2006) *Modeling and reduction of shaft voltages in ac motors fed by frequency converters*, Espoo, Finland: Tese de Doutorado.
- Mäki-Ontto, P. and Luomi, J. (2003) 'Bearing current prevention of converter-fed AC machines with a conductive shielding in stator slots', *IEEE ICEM*
- Mäki-Ontto, P. and Luomi, J. (2005) 'Induction Motor Model for the Analysis of Capacitive and Induced', IEEE International Conference on Electric Machines and Drives, San Antonio, USA.
- Moreira, A.F. (2002) *Modeling and Design of Filter Networks for High Power Converters Utilizing Fast Hard Switching Devices*, Ph.D. Thesis, Wisconsin.
- Muetze, A. (2004) *Bearing Currents in Inverter-Fed AC-Motors*, Aachen, Alemanha: Tese de Doutorado.
- Muetze, A. and Binder, A. (2005) 'Generation of high-frequency common mode currents in machines of inverter-based drive systems', European Conference on Power Electronics and Applications, Dresden
- Muetze, A. and Binder, A. (2007a) 'Calculation of Circulating Bearing Currents in Machines of Inverter-Based Drive Systems', *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 5, no. 2, pp. 932 - 938.
- Muetze, A. and Binder, A. (2007b) 'Calculation of Motor Capacitances for Prediction of the Voltage Across the Bearings in Machines of Inverter-Based Drive Systems', *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 43, no. 3, pp. 665 - 672.
- Muetze, A. and Binder, A. (2007c) 'Techniques for Measurement of Parameters Related to Inverter-Induced Bearing Currents', *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 43, no. 5, pp. 1274 - 1283.
- Oliver, J.A., Guerrero, G. and Goldman, J. (2017) 'Ceramic Bearings for Electric Motors: Eliminating Damage with New Materials', *IEEE Industry Applications Magazine*, vol. 23, no. 6, pp. 14 - 20.
- Paula, H., Almeida, W.P.d., Pereira, P., Rocha, A.V. and Filho, B.J.C. (2014) 'Driving AC motors through long distances with dc transmission: experimental results', IEEE IAS Annual Meeting, Vancouver
- Paula, H., Lisboa, M.V.C., Guilherme, J.F.R., Almeida, W.P.d. and Chaves, M.L.R. (2009) 'Differential overvoltages and common-mode currents in PWM motor drives: The influence of the cable arrangement on their characteristics', Conference of IEEE Industrial Electronics. Porto
- Persson, E. (1992) 'Transient effects in application of PWM inverters to induction motors', *IEEE Trans on Industry Applications*, vol. 28, no. 5, pp. 1095 - 1101.
- Rahman, M.F., Haider, T., Haque, E., Blackburn, T.R. and Grantham, C. (1999) 'Modelling and experimental studies of effects of steep fronted inverter waveforms on motor and supply cabling and their remedies', Proceedings of the IEEE Conference on Power Electronics and Drive System, Hong Kong
- Suwankawin, S., Pairodomonchai, P., Sangwongwanich, S., Sukhapap, C. and Tearwattanarattikal, W. (2005) 'Destruction by charge current and its solution for PWM inverter feeding multiple motors through long cables', Kowloon, Hong Kong, China.