

Estimação Online da Resistência de Estator em Máquinas de Indução com Terminais Centrais Abertos

Lorrane Prado Silva do Carmo*. Marcelo Martins Stopa**. Allan Fagner Cupertino***. Alex-Sander Amável Luiz****.

Departamento de engenharia elétrica, CEFET-MG.

**(e-mail: lorranepradoo@gmail.com)*

****(e-mail: marcelo@cefetmg.br)*

*****(e-mail: afcupertino@ieee.org)*

******(e-mail: alex@cefetmg.br)*

Abstract: Monitoring the motor performance in the industry is important to ensure that energy is efficiently used. Thus, the search for more efficient systems has driven the development of new technologies and electrical machine drive topologies. In this context, the configuration of the Open-End Winding Induction Machine emerged, which proposes to feed the machine by two converters, one at each end of the machine winding. This configuration has several advantages over the conventional one such as higher reliability, lower dc-link voltage, and three-level operation capability. It is possible to use two isolated d.c. links, one for each inverter or a single shared dc link. However, zero sequence currents can flow in the configuration where the two converters share the same bus. This current, unwanted in some applications, can be used here, with advantages, to on-line estimate the machine stator resistance. This parameter is important, among others, in implementing high-performance control techniques, efficiency, and winding temperature monitoring. Mathematical modeling is initially developed. Then, the feasibility, operability, and performance of the method are evaluated through simulations.

Resumo: O monitoramento do rendimento de motores na indústria é importante para certificar se a energia está sendo utilizada de forma eficiente. A busca por maior eficiência tem impulsionado os estudos de novas tecnologias e topologias que envolvem o acionamento de máquinas elétricas. Nesse contexto, surgiu a configuração da Máquina de Indução com Terminais Centrais Abertos (MITCA), que propõe a alimentação da máquina por dois conversores, sendo um em cada extremidade do enrolamento da máquina. Esta configuração possui inúmeras vantagens quando comparada aos acionamentos convencionais. Entretanto, na configuração em que os dois conversores compartilham o mesmo barramento c.c., pode ocorrer a circulação de correntes de sequência zero. Essa corrente, indesejada em algumas aplicações, é aqui utilizada, com vantagens, na estimação on-line da resistência de estator da máquina. Esse parâmetro é importante, entre outros, na implementação de determinadas técnicas de controle de alto desempenho, no monitoramento do rendimento e da temperatura do enrolamento. Essa é a proposta central desse trabalho. Após modelagem matemática a viabilidade, operacionalidade, e desempenho do método são avaliados por meio de simulações.

Keywords: OEW; Stator Resistance Estimation; Induction Machine; Energy Efficiency; Zero sequence.

Palavras-chaves: Máquina de Indução; Terminais Centrais Abertos; Resistência de Estator; Eficiência Energética; Sequência zero.

1. INTRODUÇÃO

Motores elétricos de indução são caracterizados por terem grande robustez mecânica e por isso são ideais para aplicações onde o ambiente pode ser considerado hostil. Esses dispositivos são empregados em larga escala na indústria para executar funções em diversos processos como bombeamento de água, compressão, elevação, ou qualquer outro processo em que a potência mecânica pode ser extraída de um eixo girante.

Os motores elétricos representam aproximadamente 70% da energia consumida pela indústria no Brasil e nos Estados

Unidos. Por outro lado, apenas os motores de potência acima de 500 cv, além dos motores utilizados em aplicações críticas, são normalmente monitorados, por causa de seus altos custos. No entanto, motores abaixo de 500 cv representam 99,7% dos motores em serviço (Lu et. al. 2008). Em média, esses motores operam com, no máximo, 60% de sua carga nominal devido a instalações superdimensionadas e, portanto, com rendimento reduzido o que resulta em desperdício de energia (Xenergy 2002).

Avaliar como a energia está sendo gasta e monitorar as condições às quais os motores elétricos estão sujeitos pode

resultar em uma economia significativa de energia. No entanto, os processos industriais são caracterizados por sua natureza contínua, sendo inviável interromper o funcionamento das máquinas para instalação de sensores em suas partes mecânicas (Lu et. al. 2008). Para alcançar o objetivo de monitorar as condições de operação dos motores em campo, muitas vezes, é necessário estimar a resistência e a temperatura do enrolamento do estator. Os métodos de estimativa online da resistência de estator (R_s) são essenciais em acionamentos sem sensor de velocidade não apenas para melhorar a precisão do controle, mas também para manter a estabilidade do sistema de controle (Yoo et. al. 2020). A partir de R_s , é possível estimar a temperatura da máquina em qualquer condição de operação desde que se tenha um ponto de referência (IEEE Std 112 2004). Também é possível estimar o conjugado eletromagnético desenvolvido que é um parâmetro fundamental para estimar o rendimento da máquina. Vários métodos têm sido propostos na literatura ao longo dos anos para estimar o conjugado. Dentre os métodos propostos, o AGT (air-gap torque) destaca-se por utilizar apenas a estimativa de R_s e as informações extraídas de tensão e corrente da máquina (Stopa et. al. 2018).

Desde a década de 80, diferentes técnicas de estimação de R_s vêm sendo estudadas (Paice 1980). O desempenho das técnicas de monitoramento da máquina, muitas vezes, depende da precisão com que R_s é estimada. Adicionalmente, a precisão das técnicas de estimação de R_s é influenciada pelos modelos matemáticos tomados como base. Assim, é importante fazer um estudo das técnicas mais usuais, de acordo com os diferentes modelos adotados. Uma breve discussão dessas técnicas é feita a seguir.

Vários modelos podem ser utilizados para estimação de R_s , por exemplo, o modelo dinâmico da máquina de indução, o modelo c.c. e modelos de sequência negativa/zero. Para o modelo dinâmico da máquina de indução, deve-se utilizar a única equação deste modelo que depende de R_s . Para este modelo, é necessário fazer medições na máquina para obter os vetores espaciais de tensão e corrente. Além disso, o fluxo é estimado por meio das correntes e indutâncias da máquina. O grande problema dos métodos que utilizam este modelo é que, com o aumento da frequência, o termo $R_s i_s$ torna-se muito pequeno perante os outros. Em motores conectados à rede isso se torna um problema, pois $R_s i_s$ fica mais sensível a erros presentes nos outros termos. Além disso, depende-se da estimação do fluxo que tem como base os parâmetros da máquina. Por estas razões, estes métodos são limitados à aplicação em velocidades reduzidas. Em máquinas conectadas à rede, este método apresenta baixa exatidão na estimação da resistência (Lee et. al. 2001).

Lee et. al. (2003) utiliza o modelo c.c. para estimação de R_s . Neste método, a impedância vista nos terminais da máquina em regime permanente é proporcional à resistência de estator. Dessa forma, se uma pequena tensão contínua for sobreposta à tensão da fonte c.a. de alimentação do motor, as componentes contínuas de tensão e corrente medidas nos terminais do motor poderão ser utilizadas para estimação de R_s . A precisão do método está relacionada ao nível de tensão contínua que será sobreposto à tensão c.a da fonte e ao tempo de duração desta

ação. Embora não seja tão sensível à frequência de operação da máquina quanto o método anterior, esse método gera pulsações de conjugado indesejáveis nos intervalos de aplicação da tensão c.c.. Portanto, deve existir um compromisso entre a precisão requerida e a pulsação tolerada. De acordo com (Yepes et. al. 2022), técnicas de injeção c.c. mais avançadas foram propostas para acionamentos trifásicos, onde a componente c.c. é combinada com um certo harmônico de segunda ordem para avaliar a pulsação no conjugado eletromagnético. No entanto, devido as simplificações e incertezas do modelo da máquina, a ondulação não é totalmente evitada, especialmente durante transientes.

Como possível alternativa ao modelo dinâmico da máquina de indução descrito anteriormente, pode-se ainda utilizar também os modelos de sequência negativa e zero para estimação de R_s . O modelo de sequência negativa, apesar de idealmente possuir impedância equivalente independente do escorregamento, ainda depende dos parâmetros da máquina. Uma vantagem associada a esse modelo é que, como a componente de sequência negativa é, em geral, pequena, a tensão induzida torna-se comparável à queda de tensão na resistência de estator, pois $R_s i_s$ fica menos sensível a erros presentes nos outros termos da equação (Lee et. al. 2001). Com relação ao modelo de sequência zero, é necessário medir as tensões e correntes para obter suas respectivas componentes de sequência zero. Para executar esse tipo de medição, é necessário permitir a circulação de componentes de sequência zero. Este modelo possibilita estimar o valor sem a dependência de qualquer outra variável e pode ser utilizado para máquinas ligadas diretamente à rede (Jacobina et. al. 2000). Diferentemente do que ocorre nos métodos de injeção de corrente contínua, este método não produz perturbações no conjugado eletromagnético.

A busca constante por maior eficiência e sustentabilidade, seja na economia de energia, na redução de custos ou no aumento da produtividade, têm impulsionado os estudos de novas tecnologias e topologias que envolvem máquinas elétricas. Como resultado destes estudos, surgiu o Acionamento de Máquinas de Indução com Terminais Centrais Abertos (MITCA ou OEW – do inglês *Open-End Windings*). O acionamento utilizando a máquina com os terminais centrais abertos é uma alternativa discutida em (Takahashi 1989) e (Stemmler et. al. 1993) que consiste na alimentação da máquina elétrica por meio de dois conversores eletrônicos trifásicos, sendo um em cada extremidade do enrolamento de estator da máquina, ao invés de fazer o fechamento em estrela ou triângulo e utilizar apenas um conversor eletrônico conectado aos terminais de entrada. Essa configuração permite a operação da máquina de indução utilizando apenas metade da tensão de barramento. A MITCA foi proposta em (Takahashi 1989) para atender à crescente demanda por cargas de alta potência e espaços físicos mais reduzidos (Kumar et. al. 2004), possuindo algumas vantagens em relação aos acionamentos convencionais, que favorecem sua utilização em veículos elétricos e híbridos, sistemas de propulsão marítima e aeronáutica, além de outras aplicações (Haque et. al. 2013).

A estimação on-line da resistência de estator por injeção de sequência zero foi proposta e testada em (Jacobina et. al. 2000)

para acionamentos convencionais modificados para contemplar um caminho de circulação de corrente pelo neutro da máquina. Apesar da indesejável conexão de neutro, os resultados lá obtidos foram bastante promissores. Dado que na configuração MITCA já existe, naturalmente, caminho para circulação de corrente de sequência zero sem a necessidade de se adicionar uma conexão com o ponto médio do barramento, esse método é extremamente apropriado. De maneira análoga ao método de injeção c.c., pode-se adicionar à tensão modulante, em intervalos regulares, uma componente de sequência zero de baixa amplitude e curta duração. A partir de medição da corrente de sequência zero, estima-se R_s de maneira confiável e com precisão compatível com as aplicações citadas anteriormente. Visando tirar proveito dessa inerente adequação e do fato de não ser o conjugado perturbado, este trabalho propõe a estimação de R_s a partir da injeção de sequência zero em máquinas com terminais centrais abertos e de maneira que a máquina seja perturbada o menor tempo possível.

O texto está organizado da seguinte maneira. A seção 2 apresenta a proposta para estimar R_s a partir da injeção de sequência zero em MITCA, o procedimento de modelagem matemática e a metodologia utilizada para as simulações dessa estimação. A seção 3 apresenta as simulações a respeito do método escolhido e os resultados da estimação desejada. Por fim, a seção 4 apresenta as conclusões do presente trabalho.

2. ESTIMAÇÃO ON-LINE DA RESISTÊNCIA DE ESTADOR POR INJEÇÃO DE SEQUÊNCIA ZERO EM MITCA

Como discutido na seção introdutória, dos diferentes métodos de estimação de R_s , o método de injeção de sequência zero se destaca pela precisão, flexibilidade e versatilidade. Além disso, devido ao baixo nível de intrusão, estudos mostram que ele é bastante adaptável a sistemas de monitoramento do rendimento e condição da máquina.

A Fig. 1 apresenta um diagrama de blocos do acionamento com máquina de indução com terminais centrais abertos (MITCA) e o processo para estimação on-line da resistência de estador com injeção de sequência zero. Nela encontram-se o motor de indução na configuração de terminais centrais abertos alimentado por dois inversores de frequência de dois níveis. O comando dos inversores é feito por dois blocos de moduladores do tipo PWM, sendo um deles responsável pela sintetização da componente de sequência zero. A partir de medição das correntes e tensões, são extraídas as componentes de sequência zero e aplicado o método dos mínimos quadrados para estimação da resistência de estador. Um detalhamento desses blocos e funções é apresentado nas subseções a seguir.

2.1 Modelo de sequência zero da máquina de indução

As equações de tensão de estador de sequência zero, v_{0s} , e enlace de fluxo de estador de sequência zero, λ_{0s} , são representadas por (1) e (2) respectivamente (Novotny et. al. 1996). A indutância L_{ls} corresponde à indutância de dispersão de estador da máquina e i_{0s} é a corrente de estador de sequência zero.

$$v_{0s} = R_s i_{0s} + \frac{d\lambda_{0s}}{dt} \quad (1)$$

$$\lambda_{0s} = L_{ls} i_{0s} \quad (2)$$

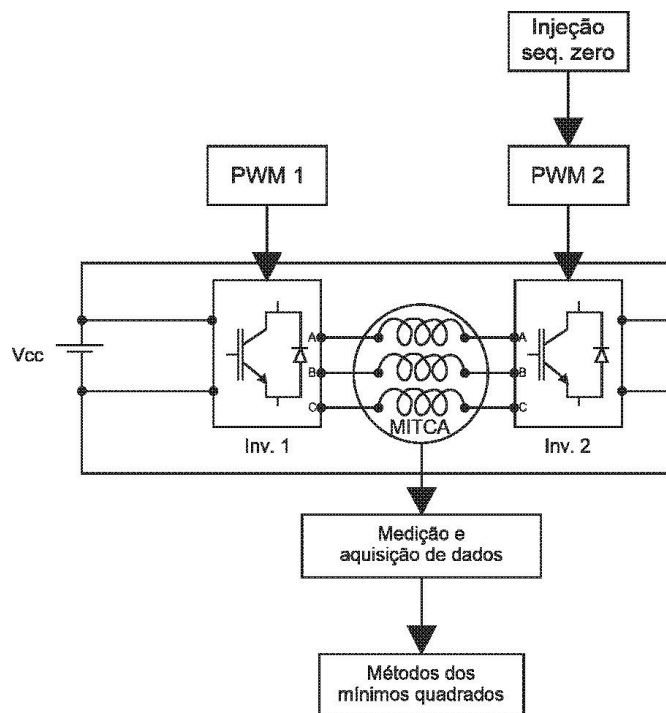


Fig. 1. Esquema para estimação de R_s utilizando configuração da máquina de indução com terminais centrais abertos.

2.2 Conversores na configuração MITCA

De acordo com (Yuan et. al. 2020), a configuração MITCA apresenta algumas vantagens quando comparada aos outros acionamentos que são usualmente utilizados, como por exemplo uma maior tolerância a faltas que podem vir a ocorrer no sistema; as tensões de bloqueio dos interruptores eletrônicos empregados nos conversores são menores que aquelas encontradas na topologia convencional; as perdas provocadas pela comutação são reduzidas ao empregar essa configuração; essa topologia possibilita a utilização de tensões menores do que as tensões normalmente utilizadas em outros acionamentos e, há a oportunidade de aumentar duas vezes a frequência da comutação sem provocar o aumento nas perdas nos inversores. Além disso, a corrente de sequência zero não perturba a velocidade do eixo e pode ser usada durante a operação normal do inversor. Em contrapartida, foi constatado que as componentes de sequência zero contribuem para o aquecimento da máquina.

Ao realizar as ligações da topologia MITCA pode ocorrer a circulação de uma corrente de sequência zero pelo neutro da máquina, caso o barramento c.c. seja compartilhado pelos dois conversores. Esse é o caso abordado neste trabalho.

2.3 Modulador (PWM)

O controle e a mitigação do efeito dessa corrente de sequência zero podem ser solucionados utilizando técnicas de modulação

por largura de pulso - PWM. Os moduladores são programados para impedir a circulação das componentes de sequência zero durante a operação, e permitir a circulação, por um curto intervalo de tempo, das mesmas componentes quando necessária para a estimação de R_s .

2.4 Esquema de injeção de sequência zero

Em (Barbosa 2018), uma estimativa da resistência de estator que utiliza a componente de sequência zero gerada inerente aos inversores e não requer a inserção de nenhuma componente a mais é possível utilizando defasamento de 120° e 180° entre as tensões de saída dos conversores. Neste caso, a simulação é iniciada com o defasamento de 120° que bloqueia a componente de sequência zero gerada, e somente no intervalo de estimação de R_s , o defasamento é alterado para 180° . No entanto, esse chaveamento da fase gera um transitório significativo na máquina.

Como alternativa a esse transitório, para se ter um maior controle no transitório, realizou-se simulações de estimação on-line de R_s utilizando defasamento de 120° durante toda a simulação e adicionando uma componente de sequência zero, ao invés de contar com aquela produzida, inerentemente, pelos inversores. Dessa forma, foi possível ajustar a amplitude e a duração da componente de sequência zero. Em um primeiro momento foi somado terceiro harmônico por cinco ciclos ao modulador e em um segundo momento, foi somado um pulso ao modulador. A injeção de um pulso, em teoria, causa perturbações na máquina por menos tempo do que os harmônicos, visto que o pulso possui duração menor que o período correspondente à injeção dos harmônicos.

Um esquema para injeção da componente de sequência zero é mostrado na Fig. 2. Nela, encontram-se o comparador analógico que recebe o sinal modulante somado com a componente de sequência zero que, em determinado momento, é o terceiro harmônico e, em outro, é o pulso, e o sinal triangular denominado de portadora. Na saída do comparador tem-se o sinal de comando que aciona o inversor.

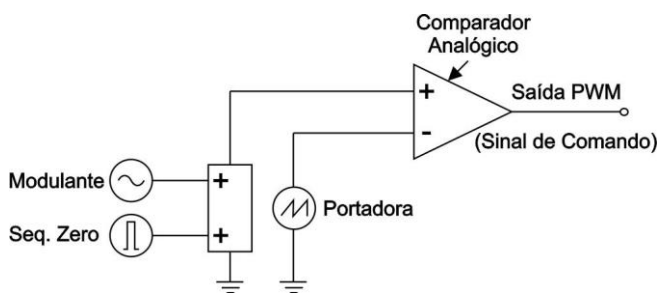


Fig. 2. Esquema de adição de componente de tensão de sequência zero no modulador.

2.5 Estimação de R_s

A estimação de R_s foi feita a partir de um algoritmo implementando o método dos mínimos quadrados em tempo discreto (Phillips et. al. 1995). De (1), o modelo de sequência zero da máquina pode ser escrito em tempo discreto para estimar R_s e L_{ls} . Este modelo é dado por:

$$i_{s0}(k) = \left[\left(\frac{L_{ls}}{T_s} - R_s \right) T_s \right] i_{s0}(k-1) + \frac{T_s}{L_{ls}} v_{s0}(k-1) \quad (3)$$

Onde T_s é o período de amostragem e k representa o instante de tempo discreto kT_s .

O sistema é descrito por uma equação de diferenças na forma descrita em (4), onde $u(k)$ e $y(k)$ representam, respectivamente, a entrada e a saída do modelo em tempo discreto no instante kT_s , e a e b são constantes.

$$y(k) = ay(k-1) + bu(k-1) \quad (4)$$

O vetor de parâmetros do modelo em tempo discreto, θ , exibido em (5) e (6), é determinado a partir das amostras de tensão e corrente de sequência zero, onde $F(N)$ é a matriz de regressores com N amostras. E, a partir dele, os parâmetros do modelo em tempo contínuo da máquina de indução podem ser calculados a partir das expressões (7) e (8) a seguir.

$$\theta = [F^T(N)F(N)]^{-1}F^T(N)y(N) \quad (5)$$

$$\theta = [a \ b] \quad (6)$$

$$L_{ls} = \frac{T_s}{b} \quad (7)$$

$$R_s = \frac{L_{ls}}{T_s} * (-a + 1) \quad (8)$$

3. RESULTADOS E ANÁLISES

Foi utilizada para as simulações uma máquina de indução de 3 hp, 220 V e 1800 rpm cujos parâmetros são dados na Tabela 1, com destaque para a resistência R_s de $0,435 \Omega$.

Tabela 1. Parâmetros da máquina de indução

R_s	$0,435 \Omega$
R_r	$0,816 \Omega$
X_{ls}	$0,754 \Omega$
X_{lr}	$0,754 \Omega$
X_m	$26,13 \Omega$
P	4
J	$0,089 \text{ kg.m}^2$

Na Tabela 1, R_r é a resistência dos enrolamentos de rotor, X_{ls} é reatância de dispersão de estator, X_{lr} é a reatância de dispersão de rotor, X_m é a reatância de magnetização, P é o número de polos e, J é o momento de inércia.

Para o desenvolvimento deste trabalho, todas as simulações foram feitas no software MATLAB/SIMULINK utilizando-se a implementação em bloco funcional da MITCA descrita em (Barbosa 2018).

As simulações foram executadas com passo variável, sendo o passo máximo igual a 1×10^{-5} s. O método de solução é uma fórmula implícita de Runge-Kutta trapezoidal como seu primeiro estágio e uma fórmula de diferenciação inversa de ordem dois como seu segundo estágio. O sinal de referência

foi amostrado como natural (padrão). A tensão escolhida para o barramento c.c. foi de 155,563 V, pois ao utilizar um mesmo barramento a tensão de entrada pode ser fixada na metade daquela de um inversor convencional. A máquina estava operando com carga nominal. O período de amostragem das simulações exibidas a seguir foi de 100 μ s.

As simulações foram realizadas para três frequências diferentes, com o objetivo de avaliar o desempenho do estimador em três regiões típicas de operação de acionamentos controlados: velocidades baixas, médias e nominal.

As variáveis mostradas nos gráficos a seguir são: corrente de estator da fase A, corrente de estator de sequência zero, conjugado eletromagnético e a velocidade de rotação. Dessa forma, é possível visualizar o efeito do sinal injetado (sequência zero) no conjugado e na velocidade de rotação. Idealmente, o sinal de sequência zero injetado não perturba essas duas últimas variáveis.

3.1 Injeção de terceiro harmônico

Foi definida uma janela de injeção de terceiro harmônico igual 5 ciclos da fundamental a partir de 1 s de simulação, com amplitude de 1/6 da fundamental.

As simulações realizadas para frequências de 5 Hz, 30 Hz e 60 Hz, podem ser observadas nas Figs. 3, 4 e 5, respectivamente.

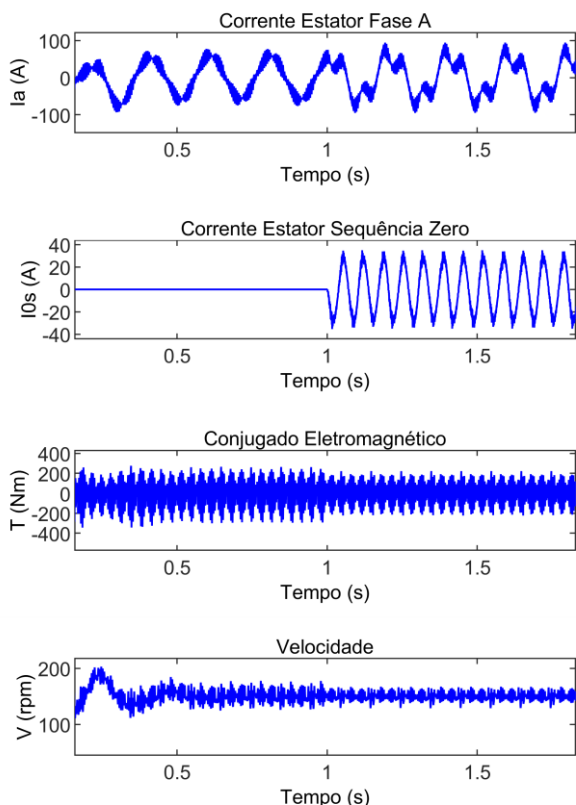


Fig. 3. Formas de onda da corrente de estator – fase A, componente de sequência zero da corrente de estator, conjugado eletromagnético e velocidade angular de rotor, respectivamente. Frequência de alimentação igual a 5 Hz.

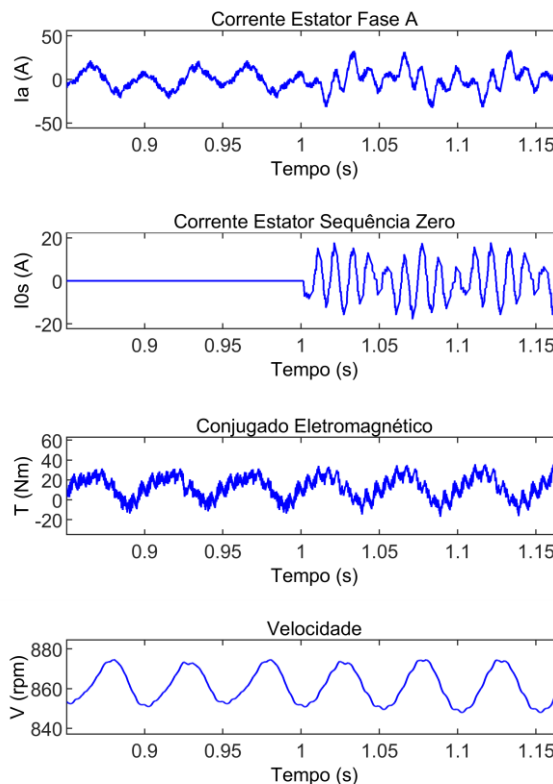


Fig. 4. Formas de onda da corrente de estator – fase A, componente de sequência zero da corrente de estator, conjugado eletromagnético e velocidade angular de rotor, respectivamente. Frequência de alimentação igual a 30 Hz.

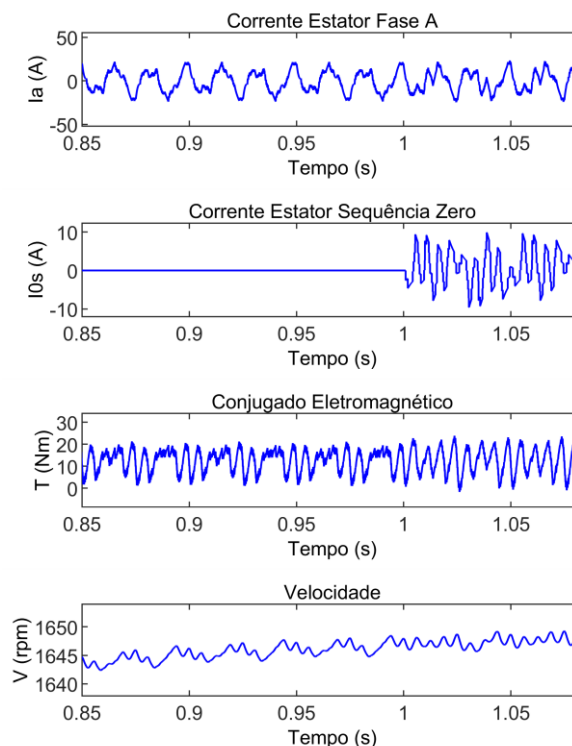


Fig. 5. Formas de onda da corrente de estator – fase A, componente de sequência zero da corrente de estator,

conjugado eletromagnético e velocidade angular de rotor, respectivamente. Frequência de alimentação igual a 60 Hz.

Analisando os resultados apresentados nas figuras 3-5, pode-se observar que embora, idealmente, o sinal injetado não perturbe o conjugado e a velocidade, na prática, essas variáveis são perturbadas por componentes espectrais espúrias produzidas no modulador.

A presença dessas componentes espúrias pode ser observada no espectro de frequência da tensão exibido na Fig. 6, onde, além do terceiro harmônico (que não perturba o conjugado), se destacam outras componentes de baixa frequência que levam à distorção do conjugado.

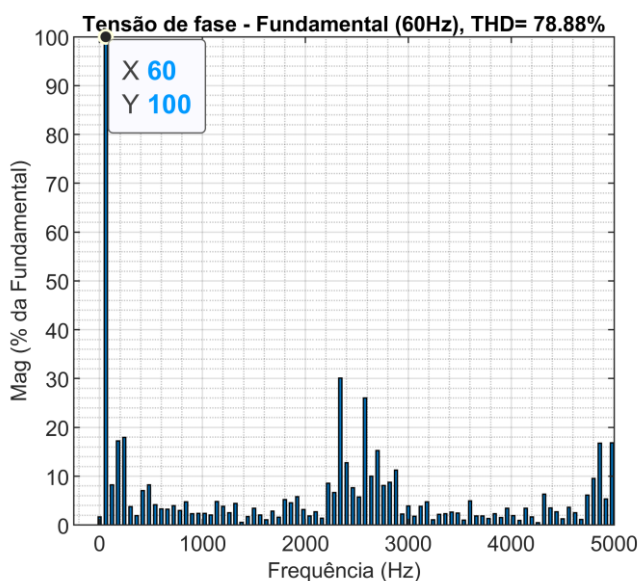


Fig. 6. Análise espectral da tensão de fase da simulação com injeção de terceiro harmônico e frequência igual a 60 Hz.

Após as simulações, o algoritmo baseado no método dos mínimos quadrados foi executado e a resistência de estator estimada foi igual a 0,435 ohms para as três frequências definidas.

3.2 Injeção de pulso de sequência zero

O pulso injetado possui amplitude de 1/6 da fundamental, largura igual a 0,5 ms e foi injetado em 1 s de simulação.

Na Fig. 7, é possível visualizar a forma de onda das correntes senoidais trifásicas com frequência igual a 60 Hz, nas proximidades do instante onde ocorre a injeção do pulso.

De forma análoga as simulações com injeção de terceiro harmônico, as simulações com injeção de pulso de sequência zero foram realizadas para frequências de 5 Hz, 30 Hz e 60 Hz, conforme pode-se observar nas Figs. 8, 9 e 10, respectivamente.

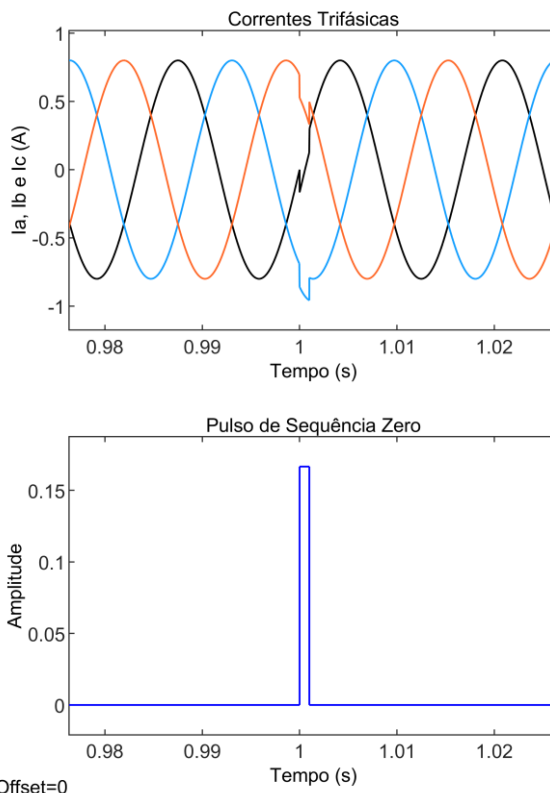


Fig. 7. Formas de onda das correntes de estator e pulso de tensão adicionado ao sinal modulante no PWM, respectivamente.

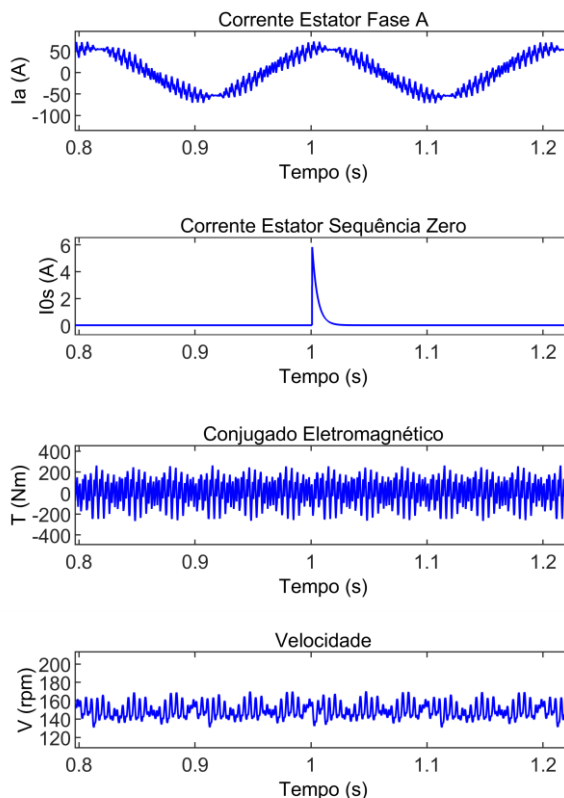


Fig. 8. Formas de onda da corrente de estator – fase A, componente de sequência zero da corrente de estator,

conjugado eletromagnético e velocidade angular de rotor, respectivamente. Frequência de alimentação igual a 5 Hz.

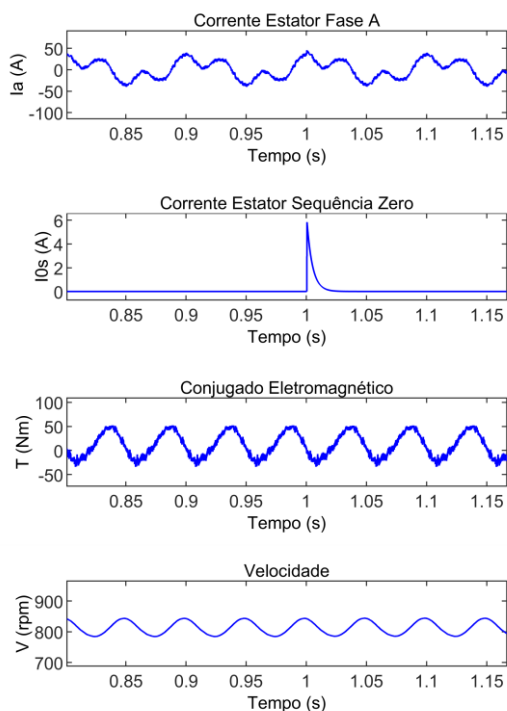


Fig. 9. Formas de onda da corrente de estator – fase A, componente de sequência zero da corrente de estator, conjugado eletromagnético e velocidade angular de rotor, respectivamente. Frequência de alimentação igual a 30 Hz.

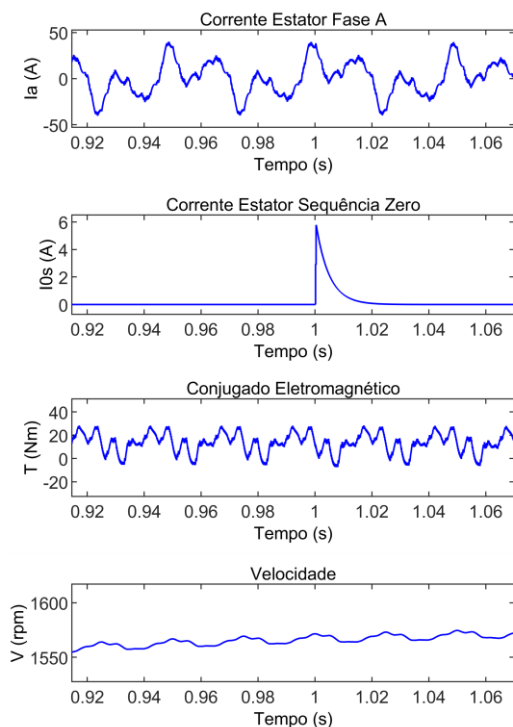


Fig. 10. Formas de onda da corrente de estator – fase A, componente de sequência zero da corrente de estator,

conjugado eletromagnético e velocidade angular de rotor, respectivamente. Frequência de alimentação igual a 60 Hz.

Analisando os resultados obtidos por essas simulações com injeção de pulso, pode-se observar que diferentemente do que aconteceu com injeção de terceiro harmônico, não houve nenhuma perturbação no conjugado eletromagnético e na velocidade.

Após as simulações, o algoritmo baseado no método dos mínimos quadrados foi executado, novamente, e assim como nas simulações com injeção de terceiro harmônico, a resistência de estator estimada foi igual a 0,435 ohms para as três frequências definidas.

Foram realizados testes com período de amostragem igual a 200 μ s, 100 μ s e 50 μ s. Mesmo com o período de amostragem maior, foi possível estimar a resistência de estator com precisão. No entanto, quando o período de amostragem é reduzido, as formas de onda das correntes de estator e do torque eletromagnético que são obtidos ficam menos distorcidas.

A resistência de estator varia com a temperatura da máquina dentro de uma faixa de até 20%, sendo assim, simulações com R_s igual a 0,348 ohms e 0,522 ohms também foram realizadas para validar o estimador. Em todas as situações o estimador apresentou a resposta esperada na estimação de R_s .

Todas as simulações foram repetidas com a máquina operando sem carga e, também não houve mudança na estimação de R_s .

Os dois métodos de injeção de sequência zero simulados neste trabalho alcançaram o objetivo de estimar a resistência de estator com precisão, apesar disso, foi possível visualizar nos gráficos das simulações que, o conjugado eletromagnético sofreu distorções com a injeção de terceiro harmônico, o que não aconteceu com a injeção do pulso.

4. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi estudado um método de estimação de resistência on-line para máquinas de indução com terminais centrais abertos. Essa configuração possibilita a circulação de corrente de sequência zero na máquina. O método não requer interrupção da operação da máquina, visto que a estimação pode ser realizada enquanto a máquina está operando, sendo necessário apenas modular o sinal com intuito de permitir a injeção de corrente de sequência zero, periodicamente, e em intervalos de curta duração, haja vista que a manutenção dessa componente pode prejudicar o rendimento da máquina.

Houve perturbação nas variáveis da máquina durante o período de injeção, devido aos harmônicos de outras ordens provenientes do processo de modulação que não contribuem para a sequência zero. Os resultados obtidos na estimação da resistência de estator foram iguais para as duas formas de injeção de sequência zero simuladas. No entanto, com a injeção do pulso, não houve nenhum tipo de perturbação nas variáveis da máquina e o mesmo possui duração menor que o período correspondente à injeção dos harmônicos. Como resultado, o pulso perturbou a máquina por menos tempo que o terceiro harmônico.

AGRADECIMENTOS

Gratidão ao CEFET-MG pelo suporte financeiro concedido que permitiu o desenvolvimento dessa pesquisa.

REFERÊNCIAS

- Lu, B. Habetler, T. G. and Harley, R. G. (2008). A nonintrusive and in-service motor-efficiency estimation method using air-gap torque with considerations of condition monitoring. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 44, 1666-1674.
- Xenergy (2002). United States Industrial Electric Motor Systems Market Opportunities Assessment. *Office Energy Efficiency Renewable Energy, U.S. Dept. Energy. Prepared for Oak Ridge Nat. Lab. and DOE's Office of Ind. Technol.*
- Yoo, J. Lee, J. Sul, S. K. and Baloch, N. A. (2020). Stator resistance estimation using DC injection with reduced torque ripple in induction motor sensorless drives. of condition monitoring. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 56, 3744-3754.
- IEEE Std 112. (2004). IEEE standard test procedure for polyphase induction motors and generators. *IEEE Power Engineering Society*.
- Stopa, M. M. Saldanha, M. A. Luiz, A-S. Baccarini, L. M. R. and Lacerda, G. A. M. (2018). A simple torque estimator for in-service efficiency determination of induction motors. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 54, 4967-4976.
- Paice, D. A. (1980). Motor thermal protection by continuous monitoring of winding resistance. *IEEE Transactions On Industrial Electronics and Control Instrumentation*, IECI-27, 137-141.
- Lee, S. B. and Habetler, T. G. (2001). An evaluation of DC- and sequence component model-based stator resistance estimation for induction machine thermal monitoring. *IEEE SDEMPED*, 151-158.
- Lee, S. B. and Habetler, T. G. (2003). An online stator winding resistance estimation technique for temperature monitoring of line-connected induction machines. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 39, 685-694.
- Yepes, A. G. Majeed, S. A. Che, H. S. Khalik, A. S. A. Ahmed, S. and Gandoy, J. D. (2022). DC-signal injection for stator-resistance estimation in symmetrical six-phase induction motors under open-phase fault. *IEEE Transactions on Industry Electronics*. Jacobina, C. B.
- Jacobina, C. B. Filho, J. E. C. and Lima, A. M. N. (2000). On-line estimation of the stator resistance of induction machines based on zero sequence model. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 15, 346-353.
- Takahashi, I. (1989). High performance direct torque control of an induction motor. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 25, 257-264.
- Stemmler, H. and Guggenbach, P. (1993). Configurations of high-power voltage source inverter drives. *The European Power Electronics Association*, 7-14.
- Kumar, A. and Chatterjee, K. (2004). DTC of open-end winding induction motor drive using space vector modulation with reduced switching frequency. *IEE Power Electronics Specialists Conference*, 35, 1214-1219.
- Haque, R. U. Kowal, A. Ewanchuk, J. Knight, A. and Salmon, J. (2013). PWM control of a dual inverter drive using open-ended winding induction motor. *Department of Electrical and Computer Engineering University of Alberta*, 150-156.
- Novotny, D. W. I. and Lipo, T.A. (1996). Vector Control and Dynamics of AC Drives. *Department of Electrical and Computer Engineering University of Wisconsin*. 57, 59-61.
- Yuan, X. Zhang, S. Zhang, C. Degano, M. Buticchi, G. and Galassini, A. (2020). Improved finite-state predictive current control with zero-sequence current suppression for OEW-SPMSM drives. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 35, 4996-5006.
- Barbosa, U. F. (2018). Análise e Desenvolvimento de Estratégias de Modulação por Largura de Pulso (PWM) para Acionamento de Máquinas de Indução com Terminal Central Aberto. *Trabalho de Conclusão de Curso, CEFET-MG*.
- Phillips, D. C. L. and Nagle, H.T. (1995). Digital control system analysis and design. *Department of Electrical Engineering Auburn University*. 404-413.