



DINCON 2017

CONFERÊNCIA BRASILEIRA DE DINÂMICA, CONTROLE E APLICAÇÕES
30 de outubro a 01 de novembro de 2017 – São José do Rio Preto/SP

Interface gráfica de um simulador baseado em Matlab para uma máquina de relutância variável 6/4

Vinícius Alexandre de Mesquita¹

Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Elétrica, UFC, Fortaleza, CE

Rômulo Nunes de Carvalho Almeida²

Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Elétrica, UFC, Sobral, CE

Wellington Assunção da Silva³

Escola de Engenharia e Arquitetura, Departamento de Engenharia Elétrica, Fanor, Fortaleza, CE

Laurinda Lúcia Nogueira dos Reis⁴

Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Elétrica, UFC, Fortaleza, CE

Renan Fonteles Albuquerque⁵

Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Elétrica, UFC, Fortaleza, CE

Resumo. Este artigo propõe uma interface gráfica desenvolvida em Matlab para simular o comportamento de uma máquina de relutância variável (MRV). Em estudos anteriores já foram desenvolvidas técnicas de controle para situações de falta de fase, as quais foram incluídas no presente trabalho. Como resultado, obteve-se uma ferramenta mais interativa para alteração das variáveis envolvidas na simulação da MRV, como indutâncias da máquina, influência da carga, parâmetros dos controladores, mudança do tipo de controlador para análise gráfica das simulações. Resultados de simulação são apresentados e comparados com resultados obtidos em ensaios experimentais.

Palavras-chave. Máquina de relutância variável. Simulador. Interface gráfica. Falta de fase.

1 Introdução

Dispositivos eletromecânicos são máquinas capazes de transformar energia elétrica em mecânica ou vice-versa [2]. Dentre esses está a máquina de relutância variável (MRV) que possui

¹ viniciusalexandre@alu.ufc.br, viniciuseleetro@gmail.com

² rmunes@ufc.br

³ wellington@dee.ufc.br

⁴ laurinda@dee.ufc.br

⁵ renanfonteles@gmail.com

características vantajosas como fácil construção, alta robustez, grande densidade de potência e baixo custo de manutenção [4].

A MRV tem uma larga faixa de velocidade de operação, permitindo sua utilização em aplicações que vão desde automotivas e aeroespaciais que operam em altas velocidades até o uso em geração eólica que operam em baixa velocidade e alto torque. Outro fator importante da MRV são suas características construtivas, que consistem em um rotor e estator com polos salientes, onde as bobinas de excitação estão dispostas em cada polo do estator. Tal disposição das fases permite uma operação em que cada fase atua isoladamente, proporcionando um certo grau de tolerância a falhas nas fases [5].

Para [5], sistemas tolerantes a falhas proporcionam um grau de segurança maior tanto ao próprio sistema, como às pessoas que fazem uso dos mesmos. Além disso, num sistema com certo grau de tolerância a falha a continuidade da operação pode ser garantida, o que é um aspecto importante, por exemplo, em aplicações aeroespaciais, automobilística ou mesmo em geração de energia. Observa-se que há vários tipos de faltas que podem ocorrer durante a operação de um MRV devido a problemas mecânicos, magnéticos ou elétricos. Com relação às faltas elétricas elas se subdividem basicamente em falhas de curto circuito, ou circuito abertos.

Vários trabalhos relacionados a faltas em MRVs foram publicados abordando o tema sob a óptica tanto da máquina quanto do conversor de alimentação da mesma [1, 3, 8]. Assim, a proposta deste trabalho tem como objetivos: analisar analiticamente o comportamento da máquina em funcionamento normal e quando submetida à falta de uma e duas fases, com relação ao torque, velocidade, tensões e correntes em cada fase. Toda esta análise será feita a partir de um simulador implementado em Matlab, com visão interativa por meio de interface gráfica dos parâmetros envolvidos como tensão, resistência interna e indutância da máquina, controladores, dentre outros.

2 A MRV

A MRV é uma máquina que tem como princípio de funcionamento o alinhamento do rotor ao estator, de modo que, ao ser aplicada uma corrente unidirecional em um dos polos salientes do estator, o rotor tenderá a se alinhar com o polo de modo a buscar sempre a indutância máxima ou, sob a ótica do circuito magnético, buscar a relutância mínima [4]. Uma máquina do tipo 6/4 é explorada neste artigo e mostrada na Figura 1.

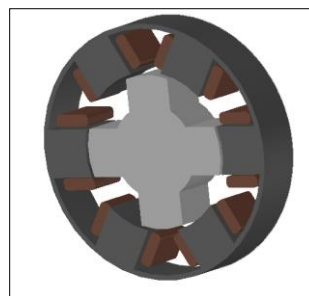


Figura 1: Máquina de relutância variável

Para que esta máquina funcione de modo satisfatório, é necessário que o eixo esteja desalinhado do polo para que haja torque elétrico e com isso ele inicie a rotação. A equação do torque elétrico é mostrada na Equação 1

$$T = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \quad \text{Equação 1}$$

em que:

- T é o torque elétrico produzido pela máquina;
- i é a corrente que circula no estator da máquina;
- L é a indutância de cada fase da máquina;
- θ é a posição do eixo do rotor com relação ao estator.

O torque elétrico, mostrado na equação 1, depende diretamente do quadrado da corrente e é proporcional à variação de indutância. Dessa maneira, para que haja torque elétrico e o rotor, por sua vez, inicie a rotação, faz-se necessário a circulação de corrente nos enrolamentos dos polos e haja variação de indutância. Um perfil de indutância por ângulo é mostrado na Figura 2 [5].

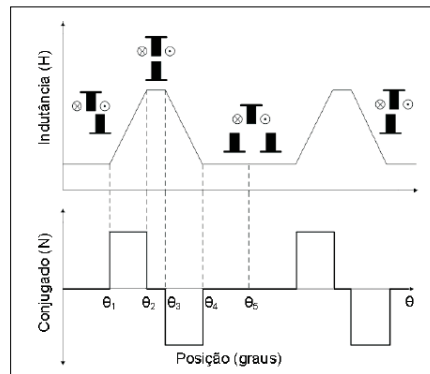


Figura 2: Indutância e torque em função da posição mecânica

Pode-se observar a partir da Figura 2 que quando há o alinhamento dos polos do rotor e do estator, a indutância é máxima. A máquina produz torque elétrico positivo quando há a circulação de corrente no enrolamento do estator e a variação de indutância é positiva, ou seja, na sua região ascendente. Na região em que a indutância decresce, a variação é negativa, caracterizando a frenagem do rotor, uma vez que o torque elétrico produzido é negativo.

Portanto, para que a máquina funcione como motor de modo satisfatório, é necessário que durante a região de variação de indutância positiva de uma fase haja o acionamento desta, produzindo torque elétrico. Ao atingir a zona de indutância máxima, o acionamento desta fase será desligado e ligada outra fase, permitindo que o torque produzido seja positivo e continue a rotação do rotor.

Para que haja torque elevado imediatamente quando a variação de indutância iniciar, se faz necessário que haja corrente circulando no enrolamento do estator. Para isso, a energização da fase antes da variação de indutância da máquina faz com que haja corrente circulando no estator plenamente. Isso deve ocorrer porque a natureza indutiva dos enrolamentos não permite a mudança brusca do valor da corrente. O desligamento da fase antes da região decrescente da indutância se faz necessária para que não haja torque negativo, ou seja, a máquina sofra frenagem do rotor.

Devido à sua característica construtiva, a máquina de relutância variável possui um comportamento bastante não linear. Esta análise também deverá ser levada em conta quando há a energização da MRV, pois haverá influência na corrente de cada fase e consequentemente no torque elétrico produzido.

Para implementação da interface gráfica, será levada em consideração as variáveis da MRV como resistência do enrolamento de campo, indutância mínima e máxima, parâmetros de controladores de velocidade, os ângulos de acionamento e desligamento de cada fase, características da carga acoplada ao eixo da MRV, tensão da fonte e os tempos de simulação e amostragem.

3 Sistema de simulação proposto

O sistema de simulação foi inicialmente desenvolvido em linhas de comando no ambiente do Matlab®. No entanto, para tornar a interação com as variáveis mais fácil e dinâmica, foi implementada uma interface gráfica com a visão dos parâmetros envolvidos necessários para a análise no âmbito da simulação, com o intuito de comparação com os resultados práticos obtidos.

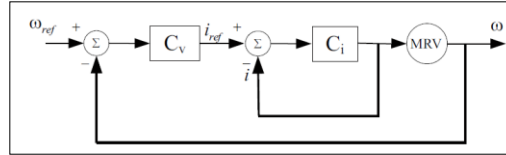


Figura 3: Diagrama de blocos do sistema de controle de velocidade da MRV

Um esquema básico do sistema está representado na Figura 3. É possível observar duas camadas de controle a serem consideradas: uma malha interna de corrente, com tempo de amostragem de 40 μ s; e uma externa de velocidade, com tempo de amostragem de 10 ms. Observa-se que o controlador de velocidade estabelece à malha interna um valor de referência de corrente. O controlador de corrente por sua vez faz os cálculos do esforço de controle a ser entregue pelo atuador (conversor de potência) à máquina propriamente dita.

O diagrama de blocos apresentado na Figura 4 a seguir, permite visualizar como as diferentes variáveis e entradas dos sistemas interagem para estimação da velocidade de saída. A velocidade de referência é estabelecida pelo usuário na entrada do sistema. Tomando como referência esta velocidade e comparando com a velocidade atual, o controlador de velocidade estabelece uma corrente de referência para a malha interna, que por sua vez determina o ciclo de chaveamento das chaves do conversor de potência, isto é, responsável pelo controle de corrente de cada fase.

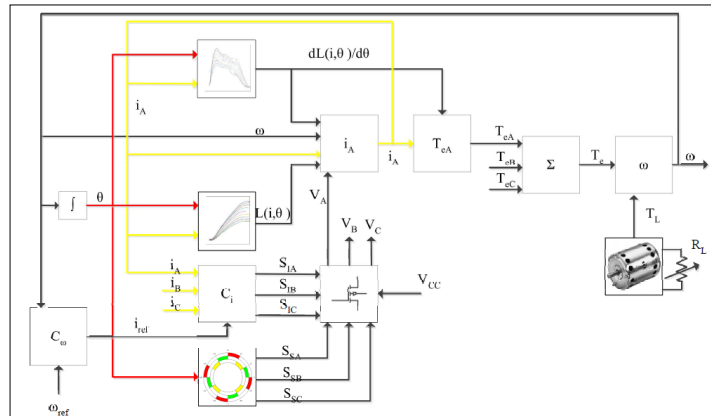


Figura 4: Diagrama de blocos do simulador

No diagrama da Figura 4 apenas uma fase (A) da máquina é descrita de forma completa, visto que as demais fases possuem a mesma estrutura. O bloco iA é responsável pela estimação do novo valor de corrente, que depende não apenas da tensão de fase V_A , mas também da velocidade da máquina, da indutância para o valor de corrente posição atuais, da derivada desta indutância com relação a posição e do valor da corrente anterior. A indutância e sua derivada são obtidas através de uma função de extrapolação do próprio Matlab utilizando os valores adquiridos em ensaio. O bloco TeA é responsável por computar o valor do torque eletromagnético da fase A. Para tal, considera-se o valor de corrente atual e da derivada da indutância com relação à posição θ para o cálculo do torque eletromagnético. Somando-se os torques instantâneos gerados pelas três fases da máquina, têm-se o valor do torque eletromagnético. O bloco ω considera os valores do momento de inércia J e do coeficiente de amortecimento B , identificados em ensaio. Essas informações juntamente com o torque eletromagnético Te e o torque de carga TL permitem o cálculo do novo valor de velocidade. A carga, por sua vez é representada pelo modelo matemático de um gerador CC, alimentando uma resistência de carga RL .

4 Resultados

A Figura 5 mostra o resultado do simulador com a interface gráfica contemplando as variáveis envolvidas na análise da MRV.

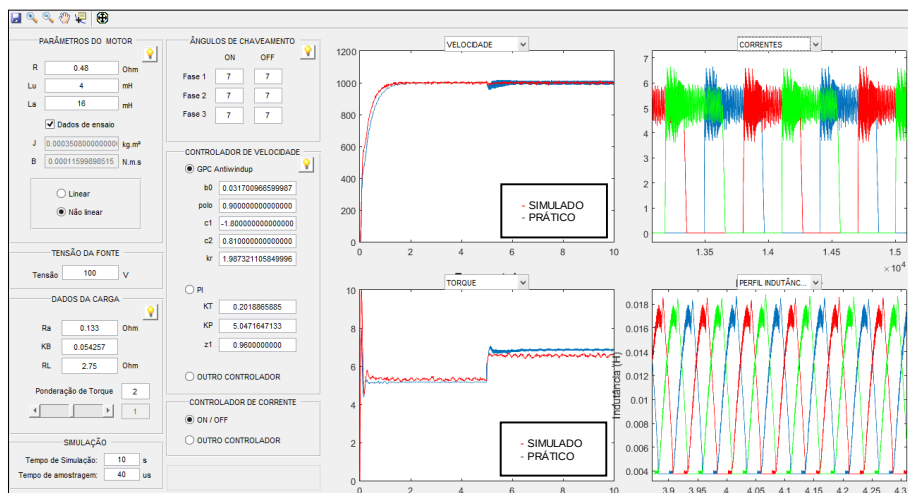


Figura 5: Simulador com interface gráfica

Os valores estão previamente preenchidos de acordo com os dados já conhecidos e utilizados, mas os campos permitem a modificação dos valores. Inicialmente tem-se os parâmetros do motor, como resistência interna, indutância mínima e máxima. Uma marcação pode ser feita para o caso de os dados de ensaio terem sido obtidos anteriormente. Os campos dos valores do momento de inércia J e do coeficiente de amortecimento B podem ser preenchidos manualmente, caso a marcação dos dados de ensaio não esteja preenchida. Pode-se selecionar um perfil de indutâncias linear ou não-linear. A tensão da fonte também possui um campo para preenchimento.

A carga acoplada ao eixo da MRV é uma máquina de corrente contínua funcionando no modo gerador e tem como carga um bloco de resistências. Estes valores podem ser informados nos campos referentes aos dados da carga, em que R_a é a resistência interna da máquina de corrente

contínua, K_B é a constante da máquina CC e R_L é a carga ligada ao gerador. Ainda há uma ponderação do torque, que funciona como um fator multiplicativo sobre o torque de carga exerce e pode ser alterado por meio de uma barra de rolagem, possibilitando pequenas alterações. Os tempos de simulação e amostragem também são campos editáveis que estão incluídas na interface para melhor observar o comportamento da MRV.

Os campos dos ângulos de chaveamento determinam o ângulo de adiantamento do acionamento (campo ON) da fase e desligamento (campo OFF) de acordo com a posição do eixo, em graus. Esta técnica, como já citado, é interessante para circulação de corrente no estator, no caso da produção de torque positivo, durante a variação de indutância, ou para a interrupção de corrente durante o decréscimo da indutância.

No controlador de velocidade, os campos editáveis são parâmetros do controlador GPC, este já desenvolvido em trabalhos anteriores [6, 7]; um controlador PI e outra opção de controlador que o usuário pode editar em uma janela que abre quando selecionado.

A última opção é o controlador de corrente, em que há a opção de se controlar apenas desligando e ligando a chave para a corrente se manter em torno da referência, ou outra opção em que o usuário pode implementar o seu próprio controlador quando selecionado.

Na parte superior do simulador tem botões para salvar os gráficos gerados, manipuladores dos gráficos e um botão para processamento da aplicação. Após processada a aplicação, quatro gráficos são apresentados do lado direito do simulador e pode-se escolher qual gráfico se deseja visualizar, sendo as opções de torque, velocidade, correntes e tensão, indutância no tempo.

5 Discussões

Os resultados obtidos da simulação quando confrontados com os valores reais ficaram próximos, validando o modelo computacional adotado para análise do comportamento da MRV quando submetida à diferentes situações de operação.

Na Figura 5 pode-se observar os resultados obtidos após a simulação ser processada. O modelo utilizado para análise se baseou no comportamento não-linear da indutância. No gráfico Perfil de Indutâncias verifica-se tal comportamento da indutância, diferente do modelo linear exposto na Figura 2. Para o processamento do modelo não-linear, o algoritmo se baseou nos dados obtidos em ensaio e, com isso, foi feita a extrapolação dos valores da indutância para a determinação em pontos que não estavam dentro dos valores estabelecidos. Com isso, houve um maior processamento de dados, o que ocasionou um aumento do tempo de processamento da simulação.

Para contornar este problema, os trechos em que havia o cálculo de extrapolação foi processado em arquivo MEX, uma aplicação do Matlab® que acelera o processamento. Com isso, obteve-se uma redução de 87,5% do tempo de processamento do simulador operado na condição não-linear.

6 Conclusão

A opção por utilizar uma interface gráfica para manipulação dos parâmetros envolvidos na análise de uma MRV permite um estudo preliminar do seu comportamento. Este simulador torna a aplicação mais interativa e menos onerosa. A organização dos gráficos apresentados também é outro diferencial, o que não ocorre quando executada a aplicação apenas em linha de código. No entanto, a simulação ainda requer a determinação de vários dados e parâmetros que devem ser mensurados.

Os simuladores são ferramentas que permitem uma visão rápida e segura do desempenho das aplicações reais, mas que precisam ser previamente conhecidos os parâmetros envolvidos para se confrontar de maneira satisfatória os resultados da simulação com os experimentais. A proposta apresentada demonstrou a viabilidade da técnica, apresentando resultados precisos e com velocidade de processamento adequada.

7 Referências

- [1] W. Ding, Analysis and Experimental Verification of Fault-Tolerant Performance of a Mutually Coupled Dual-Channel SRM Drive under Open-Circuits, Ninth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER), (2014).
- [2] A. E. Fitzgerald, Kingsley e S. D. Umans, Máquinas Elétricas , Cap. 3, vol. 1, (2006).
- [3] N. S Gameiro and A. J. M. Cardoso, Fault Tolerant Power Converter for Switched Reluctance Drives, Proceedings of the 2008 International Conference on Electrical Machines, p. 1–6, (2008).
- [4] R. Krishnan. Switched Reluctance Motor Drives: Modeling, Simulation, Analysis, Design, and Applications, CRC Press, (2001).
- [5] W. A da Silva, Controle da Máquina de Relutância Variável em Situações de Falta de Fase, Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica, UFC, (2017).
- [6] W. A. da Silva, Speed and Current Control in Switched Reluctance Motor Based on PID and Generalized Predictive Control, Industry Applications (INDUSCON), 10th IEEE/IAS International Conference, (2012).
- [7] W. A. da Silva, Speed Control in Switched Reluctance Motor Based on Generalized Predictive Control, Power Electronics Conference (COBEP), (2013).
- [8] Q. Ze, Fault-tolerant Performances of Switched Reluctance Machine and Doubly Salient Permanent Magnet Machine in Starter / Generator System, 17th International Conference on Electrical Machines and Systems, ICEMS 2014, p. 3417–3423, (2014).