



SIMULAÇÃO E ANÁLISE DE DESEMPENHO DINÂMICO DO MOTOR SÍNCRONO A RELUTÂNCIA

Paulo H. A. Silva e Silva*, Josemar A. S. Júnior, Marcos A. A. Freitas e Ghunter P. Viajante

Instituto Federal de Goiás- Departamento de áreas acadêmicas- NuPSE - Núcleo de Pesquisa em Sistemas de Energia.

Resumo - Este trabalho apresenta o desempenho do motor síncrono à relutância (MSR), considerando a influência da mudança dos parâmetros construtivos do rotor. Nesta abordagem, as principais topologias do projeto de rotores do MSR são apresentadas, seguido de um modelo matemático que represente, com fidelidade, as características do motor e simulação computacional. A estrutura de simulação consiste na determinação de parâmetros do MSR realizado, utilizando método em elementos finitos, e análise de desempenho a partir dos parâmetros obtidos. Para isso, foram utilizados o *software Finite Element Method Magnetics (FEMM)* e *MatlabTM/Simulink[®]*. Por fim, os resultados são apresentados e discutidos.

Palavras-Chave- Elementos finitos, motor síncrono a relutância, projeto de máquinas síncronas a relutância, topologia dos rotores.

SIMULATION AND DYNAMIC PERFORMANCE ANALYSIS OF SYNCHRONOUS MOTOR RELUCTANCE

Abstract - This project presents the performance of the Synchronous Reluctance Motor (SynRM) by considering the influence of changes in the constructive parameters of the rotor. Also, presents the main topologies of the rotor project of the SynRM, following a mathematical model that represents, with fidelity, the machine characteristics and computational simulation. The simulation structure consists in the SynRM's parameter determination using the finite element method, and the performance analysis from the obtained parameters. Therefore, *software Finite Element Method Magnetics (FEMM)* e *MatlabTM/Simulink[®]* were used. Finally, the results are presented and discussed.

Keywords - Finite elements, synchronous motor reluctance, synchronous machines design reluctance, rotors topology.

I. INTRODUÇÃO

Os primeiros modelos de motores síncronos a relutância foram criados a partir século XX. Embora essas máquinas

tenham surgido como alternativa para as máquinas assíncronas, os motores síncronos a relutância (MSR) tiveram seu uso intensificado apenas após o desenvolvimento da eletrônica de potência e dos sistemas microprocessados de alto desempenho e baixo custo [1].

A partir daí os MSR's foram, gradualmente, inseridos nos meios de produção industrial. Essa inserção deve-se principalmente aos baixos custos construtivos e operacionais deste motor. Além disso, a possibilidade de aplicação em grandes valores de velocidade (1800 rpm), com controle de velocidade relativamente simples e elevada densidade de conjugado, tornam este motor factível aos setores industriais [2].

A construção dos MSR's tornam-se particulares devido as características construtivos dos rotores, que são formados por chapas laminadas, e variam em relação a quantidade e formato das ranhuras presentes em cada tipo de rotor. Nesse sentido, a análise de desempenho deste motor, considerando a mudança de parâmetros construtivos do MSR é facilitada com a utilização de *softwares* em elementos finitos.

Neste trabalho, portanto, a análise desempenho de um motor síncrono a relutância (Figura 1) é realizada através do modelo matemático e simulação, utilizando o *software Finite Element Method Magnetics (FEMM)* para implementação computacional. A Figura 1 apresenta o sistema completo do motor síncrono a relutância utilizado para análise de desempenho com auxílio de simulação computacional.

Figura 1: Projeto motor síncrono a relutância de [3].



Dessa forma, o trabalho está organizado como segue: Seção II aborda o projeto do MSR, a representação em elementos finitos e a determinação de parâmetros do motor. Seção III apresenta o modelo matemático do MSR. Seção IV justifica

*paulo.ifg21@gmail.com

particularidades adotadas para realização da simulação computacional. Seção V valida a abordagem realizada com apresentação do desempenho do MSR. Seção VI tira conclusões a cerca dos resultados obtidos.

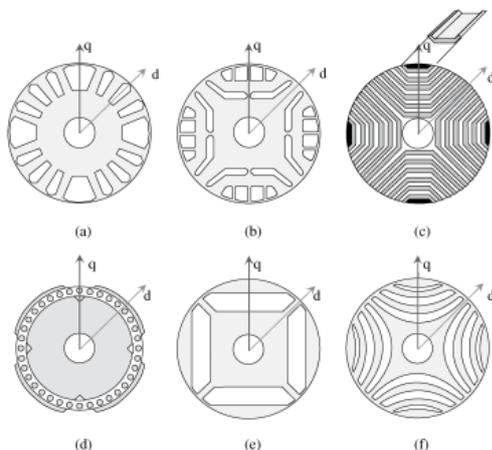
II. PROJETO DO MOTOR SÍNCRONO A RELUTÂNCIA

O MSR é construtivamente simples devido as semelhanças com outras máquinas elétricas difundidas no mercado. O rotor deste motor opera a frio, sem enrolamentos elétricos no eixo, a inércia torna-se menor e as perdas por dissipação de energia no rotor inexistentes, possibilitando dessa maneira, modelos de máquinas elétricas simplificadas e mais eficientes, devido a redução de perdas por efeito joule e rotacionais [4]. Para valores observou ainda que até 50 cv's o MSR apresenta melhor desempenho e eficiência se comparado ao motor de indução trifásico- MIT, para mesmos valores de corrente [4]. Face ao exposto, o projeto e características construtivas são apresentadas seguido da representação em elementos finitos.

A. Aspectos construtivos do rotor

Os rotores do motor síncrono a relutância são constituídos de material ferromagnético, Grão-Orientado, e são formados por um conjunto de chapas laminadas. Estas lâminas, por sua vez, possuem riscos ou ranhuras, que constituem as barreiras de fluxo ou aberturas de ar e são empilhadas ao longo do eixo do motor e direcionam o sentido do fluxo durante o funcionamento do motor [5]-[6]. Os modelos das chapas do rotor variam quanto aos formatos dos desenhos das ranhuras, tipo de elemento ou quanto a presença ou não de espaços reservados para inserção de ímãs permanentes. Neste último caso, são incluídos materiais magnéticos para existência de campos residuais e esta topologia encontra-se em aplicações nas quais são exigidas elevados valores de conjugado com baixos níveis de oscilação [7]. Nesse sentido, a Figura 2 apresenta os principais modelos de chapas laminadas utilizadas para o projeto dos rotores utilizados para construção do MSR.

Figura 2: Modelos das chapas laminadas do MSR [8].



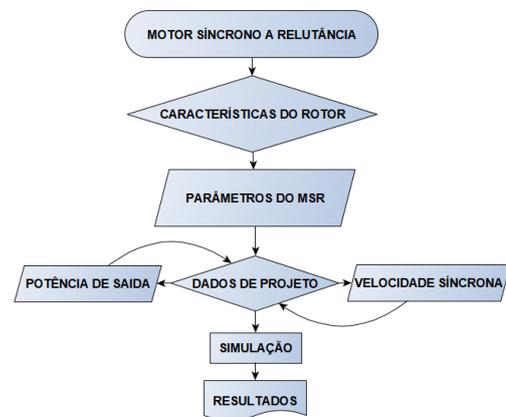
Conforme apresenta a Figura 2, a construção mais simples (a) leva a geometria do rotor de um motor de indução e remove alguns dentes das laminações do rotor perfurado. A imagem (b) mostra um rotor gaiola com barreira de fluxo laminado, e

(c) mostra um rotor axialmente laminado com espaços reservados para inserção de materiais magnéticos em forma de U fixada em pontos por eixo e cunhas não magnéticas. A imagem (d) representa um rotor gaiola, enquanto (e) representa um modelo com uma barreira de fluxo por eixo e (f) modelo transversalmente laminado [8] que foi utilizado para realização da simulação, devido a disponibilidade do rotor em laboratório (IFG, câmpus Itumbiara [3]).

B. Representação do MSR em elementos finitos

Embora a geometria dos rotores do MSR seja complexa, uma das maneiras de tornar menor a quantidade de parâmetros envolvidos no projeto é a utilização de métodos em elementos finitos [9]. Para realização desta etapa foi aplicada a metodologia apresentada no fluxograma da Figura 3.

Figura 3: Esquema representativo para realização da simulação.



A representação em elementos finitos baseou-se na escolha da geometria das chapas laminadas e fornecimento dos parâmetros do motor ao FEMM. Como parte do trabalho a representação em elementos finitos foi escolhido o modelo (f) dos rotores apresentados na Figura 2 e os parâmetros de projeto basearam-se no MSR apresentado em [3]. Quanto aos dados de projeto do motor utilizados para realização da simulação foram adotados os valores apresentados na Tabela 1:

Tabela 1: Parâmetros do MSR.

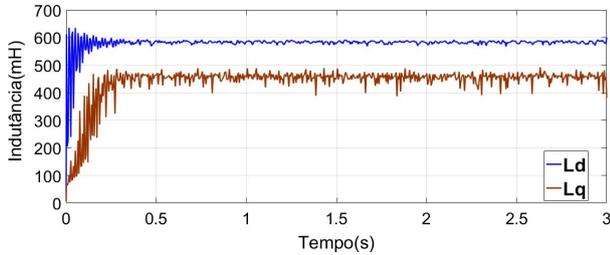
Parâmetros construtivos	Valores
Velocidade nominal	188,490 rad/s
Polos	4
Frequência	60 Hz
Abertura de ar	0,00157 m
Ângulo de fase	120
Diâmetro externo do estator	0,210 m
Diâmetro interno do estator	0,141 m
Diâmetro do rotor	0,140 m
Área da bobina	0,0025
Número de ranhuras	4
Comprimento do motor	0,140 m
Ligação elétrica do motor	Δ
Resistencia do estator	4,25 Ω
Coefficiente de atrito viscoso	0,0180

C. Parametrização das indutâncias de eixo direto e em quadratura (L_d - L_q)

A fim de diminuir os esforços para determinação de L_d e L_q foram utilizados metodologia em elementos finitos. A simula-

ção realizada possibilitou traçar o comportamento eletromagnético do MSR e as indutâncias do estator. A simulação computacional baseou-se no sistema de coordenadas direto e quadratura (d-q), a fim de simplificar a modelagem matemática e computacional, conforme é adotado em [10]. Dessa forma, as indutâncias de eixo d-q obtidas são apresentadas na Figura 4:

Figura 4: Determinação das indutâncias L_d e L_q .



Com base na Figura 4, L_d e L_q variam em regime transitório e permanente, no entanto estes parâmetros são tratados como constantes [10]. Os autores de [11] e [12] afirmam que o desempenho do MSR como conjugado eletromagnético e fator de potência estão relacionados a ótima parametrização das indutâncias (relação L_d/L_q). A magnitude desta razão está associada a topologia do rotor, quantidade e dimensões das barreiras de ar. Dessa forma, a geometria do rotor e os parâmetros de projeto estão fortemente ligadas ao comportamento eletromagnético do motor e desempenho. Nesse sentido, a distribuição das linhas de fluxo e campo magnético são apresentadas nas Figuras 5 e 6.

Figura 5: Distribuição das linhas de fluxo magnético.

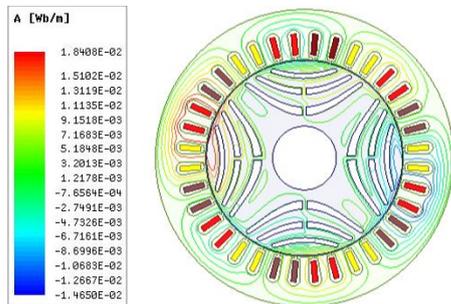
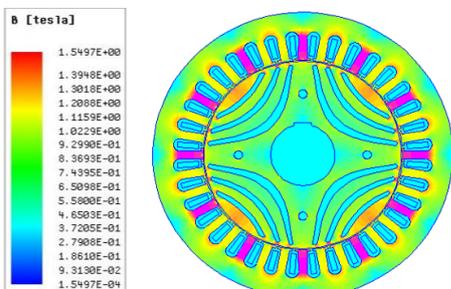


Figura 6: Densidade de campo magnético.

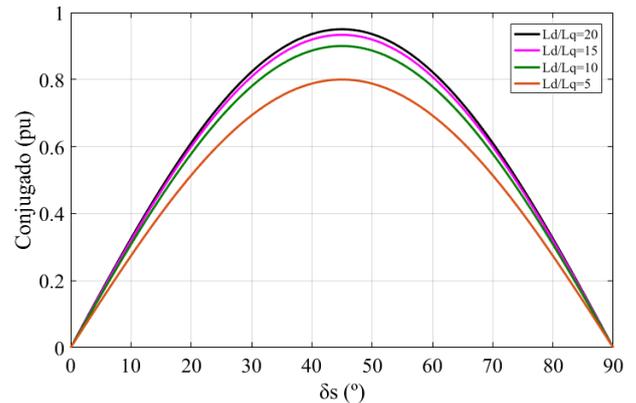


As Figuras 5 e 6 retratam o comportamento eletromagnético do motor em elemento finitos. Nestas representações a concentração de campo magnético é intensa nas proximidades das barreiras de fluxo que, por sua vez, orientam o sentido do campo magnético devido suas características de projeto, no qual a direção perpendicular às aberturas de ar representam

o sentido de maior relutância (eixo q) enquanto a região de escoamento (tangente às aberturas de ar) do campo magnético o sentido de menor relutância (eixo d) [11].

O efeito da parametrização das indutâncias do MSR se relacionam ao conjugado eletromagnético, que é evidenciado pela razão L_d/L_q . A Figura 7 apresenta o conjugado do motor em relação ao ângulo de carga (δ_s), para diferentes razões entre L_d e L_q .

Figura 7: Capacidade de produção de conjugado de um MSR para diferentes razões de fator de saliência Adaptado de [8].



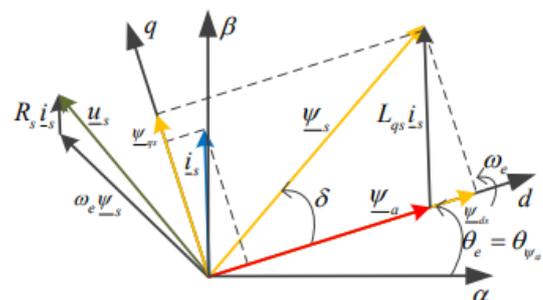
III. MODELO MATEMÁTICO DO MSR NO SISTEMA DE EIXO DIRETO E EM QUADRATURA (D-Q).

O modelo matemático desenvolvido do MSR baseia-se no sistema de coordenadas d-q, este, por sua vez, é bifásico, estacionário no tempo e defasado de 90° . Outros sistemas de coordenadas como α - β também podem ser utilizados, no entanto são desconsiderados neste trabalho devido a maior exigência de parâmetros [11]-[12]. Para modelagem matemática foram desconsiderados alguns fenômenos do motor como:

- Perdas no ferro.
- Efeitos de saturação magnética cruzada.
- Componentes harmônicas oriundas do inversor escalar Pulse Width Modulation (PWM).

Em virtude disso, o modelo matemático é obtido a partir da decomposição vetorial do diagrama vetorial apresentado Figura 8:

Figura 8: Diagrama em regime permanente da MSR [10].



A tensão do estator d-q é apresentada nas equações 1 e 2:

$$V_d = R_s \cdot I_d + \frac{d\Psi_d}{dt} - \omega_e \cdot \Psi_q \quad (1)$$

$$V_q = R_s \cdot I_q + \frac{d\Psi_q}{dt} - \omega_e \cdot \Psi_d \quad (2)$$

As equações 1 e 2 representam as tensões estatóricas. Em que R_s é a resistência do enrolamento do estator, Ψ é o fluxo magnético e ω_e a velocidade angular elétrica do rotor. A relação entre a velocidade angular elétrica do rotor e a velocidade mecânica do motor é dada por:

$$\omega_e = p \cdot \Omega_m \quad (3)$$

Onde p representa os pares de polos do motor e Ω_m a velocidade mecânica da máquina. O fluxo magnético do MSR varia relaciona-se ao comportamento das indutâncias e correntes de eixo d-q como é apresentado nas equações 4 e 5:

$$\Psi_d = L_d \cdot I_d \quad (4)$$

$$\Psi_q = L_q \cdot I_q \quad (5)$$

Dessa forma, conhecidas as equações eletromagnéticas do motor o torque é apresentado como mostra a equação 6:

$$T_e = \frac{3}{2} \cdot p \cdot (\Psi_d \cdot I_q - \Psi_q \cdot I_d) \quad (6)$$

O torque eletromagnético do motor está relacionado a diferença entre os fluxos d-q. Este por sua vez depende dos valores das indutâncias do estator. A equação 6, associada as equações 1 e 2, pode ser simplificada como está presente na equação 7:

$$T_e = \frac{3}{2} \cdot p \cdot (L_d - L_q) I_d \cdot I_q \quad (7)$$

O sistema completo do torque eletromagnético é composto por parâmetros físicos e elétricos como apresentado na equação 8:

$$T_e = \frac{d\Omega_m}{dt} + B \cdot \Omega_m + T_c \quad (8)$$

Onde B representa o atrito viscoso e T_c o torque de carga aplicado ao eixo do motor. A parcela diferencial de 8 pode ser manipulada e apresentada de acordo com:

$$\frac{d\Omega_m}{dt} = \frac{T_e - T_c \cdot B \cdot \omega_m}{J} \quad (9)$$

A composição do fluxo magnético variando no tempo dependem de parâmetros construtivos e de operação do MSR. Para determinação desta curva as equações 3 e 4 são adaptadas e substituídas nas equações 1 e 2. A manipulação matemática realizada resultam as equações 10 e 11:

$$I_d = \frac{\Psi_d}{L_d} \quad (10)$$

$$I_q = \frac{\Psi_q}{L_q} \quad (11)$$

Substituindo as equações 10 e 11 nas equações das tensões d-q do estator, encontra-se:

$$\frac{d\Psi_d}{dt} = \frac{-R_s}{L_d} \cdot \Psi_d + \omega_e \cdot \Psi_q + V_d \quad (12)$$

$$\frac{d\Psi_q}{dt} = \frac{-R_s}{L_q} \cdot \Psi_q + \omega_e \cdot \Psi_d + V_q \quad (13)$$

A distribuição destas curvas podem ser observadas na figura 5. As equações do MSR podem ser representadas na forma matricial como é apresentado na equação 14:

$$\begin{bmatrix} \frac{d\Psi_d}{dt} \\ \frac{d\Psi_q}{dt} \\ \frac{d\omega}{dt} \\ \frac{d\theta_e}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_d} & \omega_e & 0 & 0 \\ -\omega_e & -\frac{R_s}{L_q} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{B}{J} & 0 \\ 0 & 0 & p & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Psi_d \\ \Psi_q \\ \Omega_m \\ \theta_e \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ \frac{T_e - T_c}{J} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

Onde θ_e representa a posição angular do rotor. Outro aspecto a ser considerado é a relação das correntes de eixo d-q com a magnitude da corrente do estator, apresentado no diagrama vetorial da figura 8. A corrente do estator (I_s) pode ser determinada através da expressão 15:

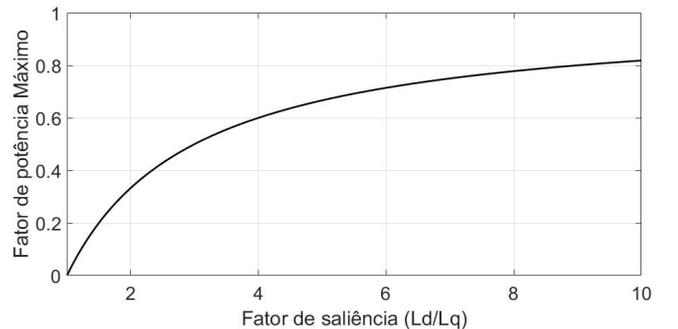
$$I_s = \sqrt{I_d^2 + I_q^2} \quad (15)$$

Finalmente é apresentado o fator de potência máximo da MSR. Com a estratégia apresentada em [13], o fator de potência máximo depende somente de L_d/L_q , onde a expressão simplificada é dada pela equação 16:

$$\cos \Phi = \frac{\frac{L_d}{L_q} - 1}{\frac{L_d}{L_q} + 1} \quad (16)$$

A Figura 9 apresenta o fator de potência do MSR a partir da variação do fator de saliência (L_d/L_q):

Figura 9: Fator de potência máximo do MSR.

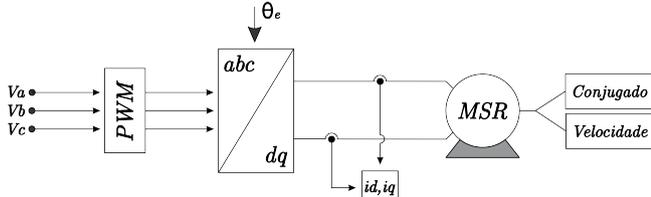


Para relações de saliência maiores que 6 o fator de potência máximo do MSR é superior em relação ao MIT [13].

IV. SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DO MSR

O estator do MSR é semelhante aos motores de indução trifásicos e o acionamento deste motor necessita da modulação do sinal oriundo da rede para adequação da velocidade de operação do motor [14]. A Figura 10 exemplifica a estrutura de simulação.

Figura 10: Velocidade resultante do motor.

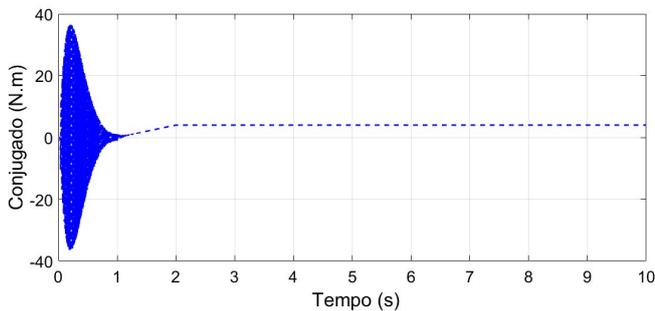


Onde θ_e representa o ângulo de defasagem da rede. A metodologia utilizada consiste na transformação do sinal PWM do sistema abc para eixo de coordenadas d-q, determinação das correntes d-q, adequação do sinal de entrada ao modelo matemático apresentado na sessão III e obtenção do comportamento da velocidade e conjugado do MSR. O modelo de lâmina do rotor utilizado para simulação foi o (f) da figura 2, conforme o modelo construído em [3].

V. RESULTADOS E DISCUSSÕES

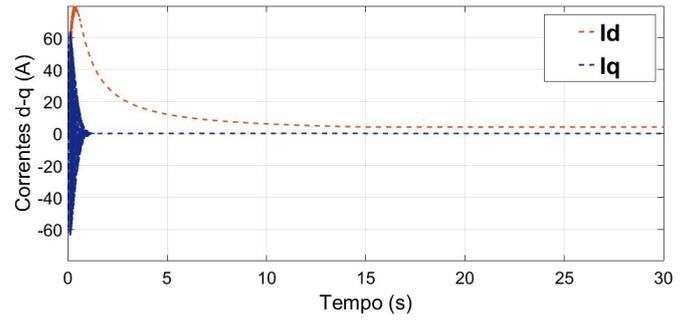
Como parte do trabalho são apresentados os resultados do MSR como velocidade do motor, conjugado e comportamento das correntes d-q. Ambos resultados mantêm as características do princípio de funcionamento da máquina elétrica. A Figura 11 representa o conjugado eletromagnético do MSR para situação de partida a vazio com inserção gradual de carga:

Figura 11: Conjugado eletromagnético do motor síncrono a relutância.



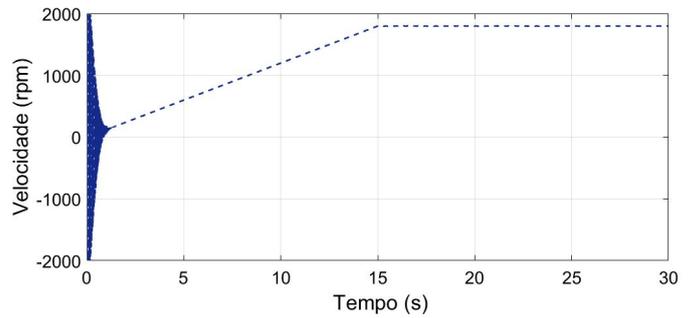
Conforme apresenta a figura 11, o conjugado ofertado à carga é constante, apresentado baixos valores na oscilação de conjugado. Como a simulação foi realizada em malha aberta (sem controle vetorial) o conjugado do MSR oscila consideravelmente para cargas não lineares [14]. As correntes d-q do MSR são estacionárias em regime permanente, no entanto refletem o comportamento das correntes no sistema de coordenadas abc [3] e [10]. O comportamento destas são apresentadas na Figura 12:

Figura 12: Correntes do estator.



A velocidade do MSR é proporcional a frequência da rede. Dessa maneira, a operação da modulação do PWM resulta mudança dos valores de velocidade como segue na Figura 13.

Figura 13: Velocidade resultante do motor.



Na figura 13 a frequência de operação fixa parte de 0 Hz até 60 Hz, região onde o motor alcança 1800 rpm.

VI. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentado o projeto do motor síncrono a relutância, modelo matemático e estrutura de simulação. A simulação realizada utilizando o método em elementos finitos mostra através da distribuição das linhas de fluxo que não existe indução eletromagnética no rotor e que as indutâncias do motor apresentam moderados níveis de variação em regime permanente.

A implementação computacional do modelo matemático serviu como suporte para análise do comportamento dinâmico do MSR. Foi possível observar que o fator de potência (fp) está associado a relação L_d/L_q e para elevados valores desta razão maiores são os níveis de fp. Além disso, o conjugado e correntes do motor apresentam comportamento constante após o regime transitório, enquanto a velocidade alcança valor nominal quando a frequência da rede é de 60 Hz.

REFERÊNCIAS

- [1] Riba, J.-R., López-Torres, C., Romeral, L. and Garcia, A. Rare-earth-free propulsion motors for electric vehicles: A technology re- view, Renewable and Sustainable Energy Re- views 57: 367–379, 2016.
- [2] Taghavi, Seyedmorteza Pillay, P. A Sizing Methodology of the Synchronous Reluctance Motor for Traction Applications. Emerging and Selected Topics

- in Power Electronics, IEEE Journal of. 2. 329-340. 10.1109/JESTPE.2014.2299235, 2014.
- [3] Santos Jr, J. A. Construção, acionamento, controle e análise de desempenho dinâmico de um motor síncrono a relutância, Tese Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, 2018.
- [4] Matsuo, T. and Lipo, T. A. Rotor design optimization of synchronous reluctance machine, IEEE Transactions on Energy Conversion 9(2): 359–365, 1994.
- [5] Hudák, P., Hrabovcova, V. and Rafajdus, P. Geometrical dimension influence of multi-barrier rotor on reluctance synchronous motor performances, International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, 2006. SPE-EDAM, IEEE, pp. 346–351, 2006.
- [6] Lamghari-Jamal, M.-I. Modelisation magnéto-thermique et optimisation de machines rapides: application à la machine synchrone à relutance variable, PhD thesis, Nantes, 2006.
- [7] Schmidt, E. and Brandl, W. Comparative finite element analysis of synchronous reluctance machines with internal rotor flux barriers, IEMDC 2001. IEEE International Electric Machines and Drives Conference (Cat. No. 01EX485), IEEE, pp. 831–837, 2001.
- [8] Pyrhonen, J., Hrabovcova, V. and Semken, R. S. Electrical machine drives control: An introduction, John Wiley Sons, 346-359, 2016.
- [9] C. E. G. Martins; P. Kuo-Peng ; N. Sadowski. “Design of synchronous reluctance motors with flux barriers using 2D-FEM”. IEMDC’03. IEEE International, p. 1669-1673, Vol. 3, 1-4 June, 2003.
- [10] Oliveira, A. M. d. S. Controlo de um motor síncrono de relutância sem sensor de posição, Master’s thesis, Coimbra, 2015.
- [11] Zaim, M. E. H. High-speed solid rotor synchronous reluctance machine design and optimization, IEEE Transactions on Magnetics 45(3): 1796–1799, 2009.
- [12] Pellegrino, G., Cupertino, F. and Gerada, C. Automatic design of synchronous reluctance motors focusing on barrier shape optimization, IEEE Transactions on Industry Applications 51(2): 1465–1474, 2015.
- [13] Betz, R. E.; Lagerquist, R.; Jovanovic, M.; Miller, T. J. E.; Middleton, R. H.; “Control of synchronous reluctance machines”. IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. 29, no. 6, pp. 1110 - 1122, 1993.
- [14] Riba, J.-R., López-Torres, C., Romeral, L. and Garcia, A. Rare-earth-free propulsion motors for electric vehicles: A technology review, Renewable and Sustainable Energy Reviews 57: 367–379, 2016.