

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO GERADOR A RELUTÂNCIA VARIÁVEL AUTO EXCITADO OPERANDO EM VELOCIDADES VARIÁVEIS

Reis, F. F, Silveira, A. W. F. V, Gomes, L. C, Andrade, D. A, Rodrigues, K. D, Fleury, A. V. S.*
Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Elétrica, Laboratório de Acionamentos Elétricos (LAcE)
Uberlândia, Minas Gerais, Brasil

*Universidade Estadual de Goiás, Goiânia, Goiás, Brasil
fernanda.reis992@gmail.com, gutofleury@gmail.com, lcgomes2005@gmail.com

Resumo – Este artigo apresenta um estudo da eficiência de um gerador a relutância variável auto excitado operando com velocidades variáveis. Para o estudo em questão foi mantido constante o ângulo de magnetização que atua nas chaves do conversor half bridge das fases do gerador, já que a alteração deste fez com que o pico de corrente seja diferente. Esta estratégia foi implementada na forma de simulação computacional utilizando o software MatLab/Simulink® e experimentalmente, utilizando DSP.

Palavras-Chave – Ângulo de magnetização, conversor half bridge, gerador a relutância variável, indutância.

PERFORMANCE EVALUATION OF SELF EXCITED SWITCHED RELUCTANCE GENERATOR OPERATING IN VARIED SPEEDS

Abstract - This paper presents a study of the efficiency of a self excited switched reluctance generator operating at variables speeds. For the study in question was kept constant the magnetization angle which operates in the switches of half bridge converter in generator phases, whereas the change of this angle will be a different peak current. This strategy was implemented in the form of computer simulation using Matlab / Simulink ® software and experimentally using DSP.

Keywords - Angle of magnetization, half bridge converter, switched reluctance generator, inductance.

I. INTRODUÇÃO

A máquina de relutância variável, também conhecida como MRV, tem como uma de suas principais características a presença de saliências tanto no rotor quanto no estator. Essa máquina tem sido alvo de várias pesquisas recentemente, devido ao fácil controle em velocidades variáveis, além de ser uma máquina mais barata em relação às outras devido a sua característica construtiva.

Na construção da MRV utiliza-se menos cobre, pois não é necessário que sejam feitos enrolamentos no rotor, que é constituído de material magnético, este tende a girar no sentido de se alinhar com o fluxo produzido no estator. Esse processo de variação no ângulo do rotor implica no aumento da indutância, fazendo com que consequentemente a relutância diminua. Apesar disso o conjugado da máquina continua constante.

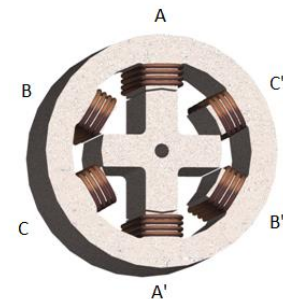


Fig. 1. Saliências no estator, com enrolamentos de cobre e rotor.

A ausência de enrolamentos no rotor diminui as perdas joule e diminui o custo, e também facilita a refrigeração da máquina, já que existe uma dificuldade na ventilação do rotor. Esses fatores permitem que seja construída uma máquina com potência nominal equivalente com um tamanho físico menor, ou seja, permite que ela tenha um alto rendimento. É conhecida também pela sua confiabilidade, robustez e baixo momento de inércia [5].

Além de todas as características citadas acima, a máquina a relutância variável é também dual, pois pode ser acionada como motor ou gerador, sendo isso possível alterando o ângulo do pulso de magnetização.

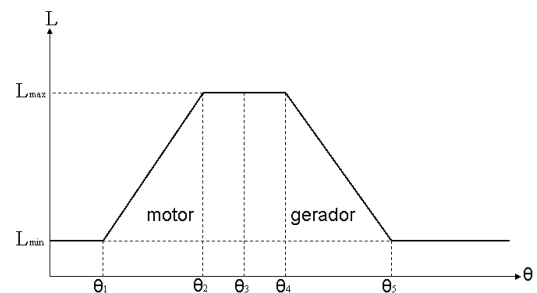


Fig. 2. Característica da MRV operando como motor/gerador.

Várias pesquisas têm sido realizadas tendo essa máquina como objeto de estudo em diferentes contextos, dos quais se podem citar:



XII CEEL – ISSN 2178-8308
13 a 17 de Outubro de 2014
Universidade Federal de Uberlândia – UFU
Uberlândia – Minas Gerais – Brasil

- Devido à facilidade com que o gerador a relutância variável (GRV) opera em velocidades variáveis, ele tem sido bastante utilizado em geração eólica, automóveis e aeronaves, as quais necessitam desse tipo de característica [4].

- A MRV pode ser utilizada para armazenar energia na forma de energia cinética. Estão sendo utilizados armazenadores do tipo *flywheel* (volante de inércia), em que este volante gira em elevadas velocidades e momento de inércia pequeno ou baixas velocidades e alto momento de inércia. Este é um sistema em que a MRV converte a energia através da variação da velocidade do *flywheel* [1].

A. Acionamento da MRV

Nesse projeto será utilizada uma MRV trifásica, com seis polos no estator e quatro no rotor (6x4), sendo cada par de polos do estator uma fase da máquina. Esta máquina funciona através do alinhamento do rotor e estator, então quando eles estiverem desalinhados a fase em que o rotor estiver mais próximo do alinhamento será energizada, fazendo com que o movimento do rotor seja favorável ao alinhamento com o estator, onde o fluxo concatenado será maior.

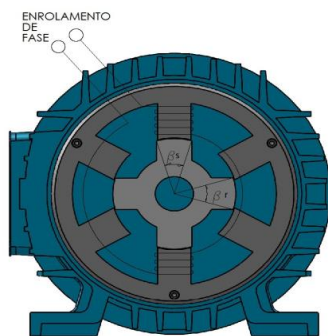


Fig. 3. Perfil transversal da MRV.

Quando ocorre o alinhamento do rotor e estator, a indutância é máxima e a relutância é mínima, isso faz com que haja uma tendência do rotor permanecer naquela posição, a qual será considerada, para a fase A um ângulo de zero grau e está representada na figura 4.

Porém para que a máquina continue seu movimento rotacional para completar 360° é necessário que uma próxima fase seja energizada, fazendo com que não exista mais fluxo naquela posição para aquela fase. Tendo em vista que a MRV do tipo 6x4 tem um ciclo de indutância em função da posição do rotor de 90° , como pode ser visto na figura 2, no momento em que a fase A for desligada, o rotor irá deslocar-se, o que provocará uma variação linear e negativa da indutância com relação ao ângulo de deslocamento que é de no máximo 30° , período em que a máquina opera como gerador.

Após esse deslocamento o rotor estará localizado numa posição de total desalinhamento com a fase A, como pode ser observado na figura 5, além de estar em um ponto que a indutância é mínima e o entreferro ou relutância é máximo.

Na seguinte etapa o rotor começará a alinhar-se novamente com a fase que está sendo analisada, causando uma variação linear e positiva da indutância com relação ao ângulo de deslocamento, que é o instante em que a máquina se comporta como motor.

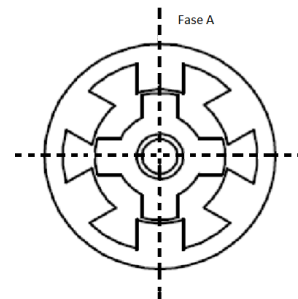


Fig. 4. Alinhamento do rotor e estator para a fase A.

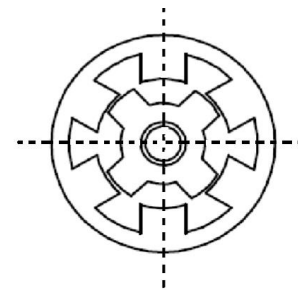


Fig. 5. Total desalinhamento do rotor e estator para a fase A.

A fase que está sendo alimentada será desligada enquanto a fase em que o alinhamento for mais provável de acontecer irá ser energizada, para isso faz-se necessário o conhecimento da posição do rotor todo instante, tendo em vista essa necessidade, é indispensável à utilização de um disco de posicionamento com sensores ópticos. Assim como está mostrado na figura 6.

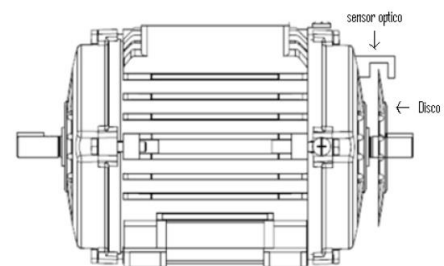


Fig. 6. Localização do sensor óptico e disco de posicionamento na MRV.

B. Modelo do Conversor

Para que ocorra o funcionamento correto de sequência de energização das fases desta máquina é necessário que ela seja acionada por um conversor, além disso, este deve ser capaz de tornar a MRV um gerador a relutância variável auto excitado. Para isso optou-se pelo conversor do tipo *half bridge*, o qual tem sido utilizado frequentemente em vários projetos para o acionamento desse tipo de máquina, figura 7, e foi adicionado a ele um capacitor com uma tensão inicial

em paralelo com a carga para que houvesse uma excitação inicial da máquina [9].

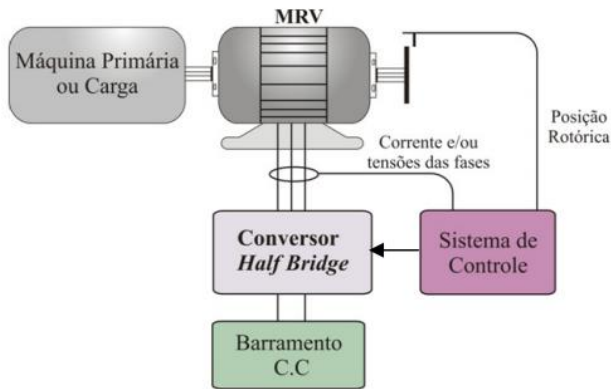


Fig. 7. Diagrama de blocos para acionamento da MRV.

As figuras abaixo representam o conversor e seus estágios de funcionamento.

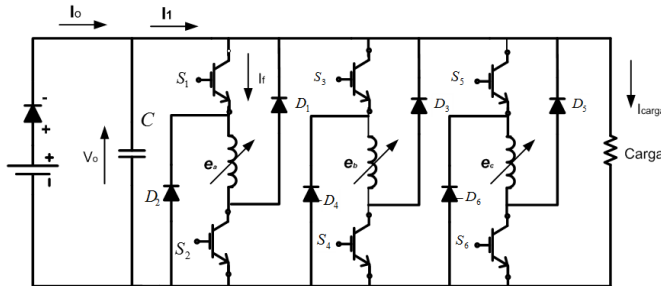


Fig. 8. Circuito trifásico do conversor half bridge com uma carga.

Este conversor possui chaves do tipo IGBT (600V/100A), sendo que cada chave deste conversor depende de um certo ângulo de disparo, o qual é obtido através de um sistema de controle para obter o melhor aproveitamento da MRV. A comunicação com este sistema é feita pelo sensor óptico acoplado a máquina. Esse disparo ocorrerá no momento em que houver um desalinhamento total da fase e rotor, sendo esta fase energizada durante 30° somente [5].

Essa energização será dividida em três etapas de mesma duração. Sendo que numa primeira etapa o capacitor, o qual foi inicialmente carregado com uma tensão contínua, fornecerá uma corrente I_r para que o enrolamento da fase que estiver desalinhada seja excitado através das chaves S_1 e S_2 , e uma corrente I_{carga} para a carga, verificado na figura 8.

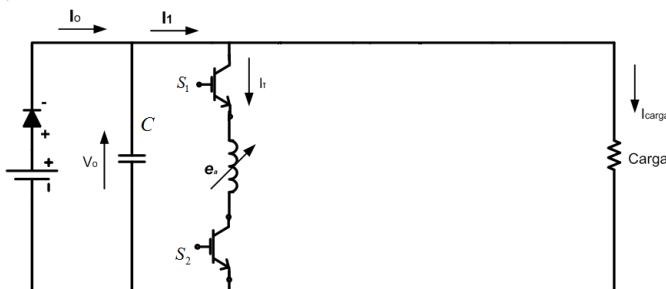


Fig. 8. Excitação da fase.

É considerada uma segunda etapa quando a chave S_1 é aberta e o fluxo passa pela chave S_2 e pelo diodo D_2 , representado na figura 9. A corrente na fase continua sendo aumentada pela força eletromotriz.

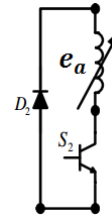


Fig. 9. Roda livre.

Após esse período de excitação da fase da máquina as chaves S_1 e S_2 não conduzirão mais, passando para uma terceira etapa de funcionamento. Nessa etapa o enrolamento da fase deixará de receber corrente das chaves e através dos diodos ele fornece uma corrente que alimentará a carga e recarregará o capacitor, como pode ser observado na figura 10.

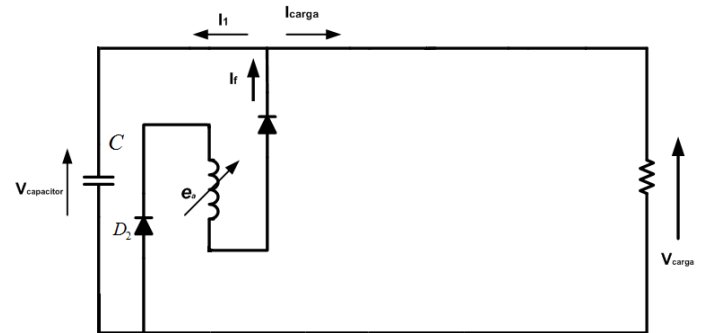


Fig. 10. Roda livre para carregar capacitor.

C. Estudo Analítico

Na partida do GRV é utilizado um processo de escorvamento de tensão, o qual tem a função de levar a uma saturação do circuito magnético da máquina. Onde o magnetismo residual da máquina é usado para gerar uma pequena tensão que será realimentada no campo magnético, o que irá proporcionar um magnetismo maior, que por sua vez irá gerar uma tensão maior e assim sucessivamente, até que ocorra a saturação magnética. Portanto, o modelo matemático para esta máquina deve levar em consideração a saturação magnética, se não a tensão continuaria aumentando linearmente e infinitamente. Quando a saturação magnética é atingida, os valores de tensão começam a permanecer praticamente constantes.

Devido a isso a tensão para uma fase do circuito pode ser representada da seguinte maneira:

$$v = Ri + L \frac{di}{dt} + i\omega \frac{\partial L(i, \theta)}{\partial \theta} \quad (1)$$

Onde v é a tensão aplicada, i é a corrente da fase, R é a resistência da fase, $L(i, \theta)$ é a indutância incremental da

fase, θ é a posição do rotor, $\omega = \frac{d\theta}{dt}$ é a velocidade angular

e $i \cdot \omega \cdot \frac{dL(i, \theta)}{d\theta}$ é a força contra eletromotriz e .

A força contra eletromotriz é definida pela variação da indutância com relação à posição do rotor, já que a corrente e velocidade angular são sempre positivos. Se tal variação for negativa, há uma tendência de aumento de corrente e de conversão da potência mecânica para a potência elétrica.

Para obter a potência instantânea da fase, basta multiplicar a equação 1 pela corrente.

$$vi = Ri^2 + iL \frac{\partial i}{\partial t} + i^2 \omega \frac{\partial L}{\partial \theta} \quad (2)$$

A variação da energia armazenada no campo magnético (dw_{campo}) é dada por [5].

$$dw_{campo} = \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} i^2 L \right) = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{dt} + Li \frac{di}{dt} \quad (3)$$

Sabe-se que a indutância varia com o tempo e a posição, logo a equação 3 é escrita como

$$dw_{campo} = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{d\theta} \frac{d\theta}{dt} + Li \frac{di}{dt} \quad (4)$$

Sendo $\omega = \frac{d\theta}{dt}$, a equação 4 torna-se

$$dw_{campo} = \frac{1}{2} i^2 \omega \frac{dL}{d\theta} + Li \frac{di}{dt} \quad (5)$$

Devido ao princípio de balanço de energia, o trabalho mecânico é definido como a energia elétrica líquida de entrada menos a energia armazenada no campo [3].

$$dw_{mec} = dw_{ele} - dw_{campo} \quad (6)$$

A somatória da energia do campo magnético, das perdas joulicas e a energia transformada em força mecânica são iguais a energia total instantânea que é mostrada na equação 7.

$$Ri^2 + iL \frac{di}{dt} + i^2 \omega \frac{dL}{d\theta} = \frac{1}{2} i^2 \omega \frac{dL}{d\theta} + Li \frac{di}{dt} + Ri^2 + C\omega \quad (7)$$

Simplificando a equação 7:

$$-C\omega = \frac{1}{2} i^2 \omega \frac{dL}{d\theta} - i^2 \omega \frac{dL}{d\theta} \quad (8)$$

Da equação 8 pode ser obtido o conjugado eletromagnético:

$$C = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{d\theta} \quad (9)$$

A equação 9 mostra que o conjugado será definido pela variação da indutância. Nesse projeto será utilizada a MRV operando como gerador, logo deve ser obtido um conjugado sempre negativo, para isto, a corrente deverá ser nula quando a variação da indutância for positiva.

Para a realização da modelagem matemática da máquina foi utilizada a seguinte equação mecânica:

$$C_m - C_{emag} - J \frac{d\omega}{dt} - D\omega = 0 \quad (10)$$

Onde C_m é o conjugado mecânico, C_{emag} é o conjugado eletromagnético, ω é a velocidade angular, J é o momento de inércia e D é o coeficiente de atrito viscoso.

Na equação 9 é representado conjugado somente para uma fase da MRV, sendo que para as três fases a equação será:

$$C_{emag} = -\frac{1}{2} \left(i_a^2 \frac{\partial L_a(i, \theta)}{\partial \theta} + i_b^2 \frac{\partial L_b(i, \theta)}{\partial \theta} + i_c^2 \frac{\partial L_c(i, \theta)}{\partial \theta} \right) \quad (11)$$

Logo o modelo matemático que representará a MRV considerando as três fases será mostrado a seguir:

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \\ C_m \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a \\ 0 \\ 0 \\ r_1 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_b & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_c & 0 & 0 \\ r_1 & r_2 & r_3 & D & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ \omega \\ \theta \end{bmatrix} \quad (12)$$

Onde $r_1 = -\frac{1}{2} \cdot i_a \cdot \frac{\partial L_a(i, \theta)}{\partial \theta}$, $r_2 = -\frac{1}{2} \cdot i_b \cdot \frac{\partial L_b(i, \theta)}{\partial \theta}$ e

$$r_3 = -\frac{1}{2} \cdot i_c \cdot \frac{\partial L_c(i, \theta)}{\partial \theta}$$

Sejam $[V]$, $[R]$, $[I]$, $[L]$ e as respectivas matrizes que compõem a equação 12, formam a matriz de estados do GRV, da seguinte maneira:

$$\begin{bmatrix} \dot{I} \end{bmatrix} = [L]^{-1} [V] - [L]^{-1} [R] [I] \quad (13)$$

Este modelo matemático tem sido utilizado em diversas pesquisas [5], [3] com excelentes resultados para verificação do comportamento das máquinas a relutância variável.

II. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

Afim de que o comportamento do GRV fosse estudado, foi utilizada a plataforma Matlab/Simulink® para simular a máquina à relutância variável 6/4 operando como gerador. O modelo computacional do gerador foi montado a partir da matriz de estado do GRV e baseado no controle da tensão na carga do gerador.

Os gráficos que serão mostrados a seguir provêm da simulação em que o gerador a relutância operou em malha fechada e foi utilizada a carga resistiva fixa de $40[\Omega]$, a tensão de referência do controlador foi fixada em $110[V]$, o valor de capacitância do capacitor é $10 [nF]$ com tensão inicial é de $12[V]$ e a velocidade foi mantida constante em $320 [rad/s]$. A máquina foi simulada por 5 segundos.

Na figura 11 são mostradas as correntes medidas nas fases de $6,5 [A]$ e pode ser observado o controle atuando nas correntes para que a tensão possa ser mantida constante e próxima à referência adotada.

A figura 12(a) mostra uma tensão contínua e a figura 12(b) mostra que a tensão gerada é pulsada o que representa as características desse tipo de máquina, isso pode ser corrigido através do uso de um capacitor maior. Essa é a tensão que é aplicada aos terminais da carga e conforme a tensão de referência definida no controlador foi de $110 [V]$, pode ser observado que o controlador está funcionando já que a tensão verificada é de aproximadamente $105 [V]$.

A figura 13 representa a curva indutância em uma das fases do gerador a qual funciona alternadamente devido à característica construtiva da máquina com um valor de pico de $0,09 [H]$.

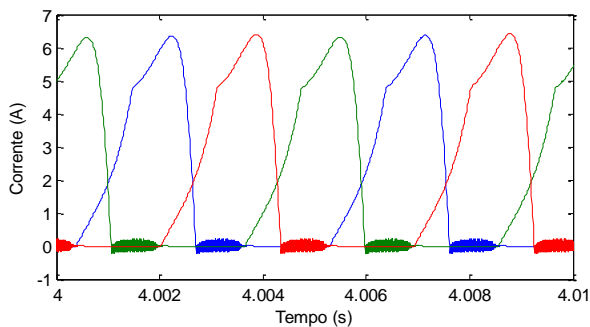


Fig. 11. Correntes nas fases A, B e C.

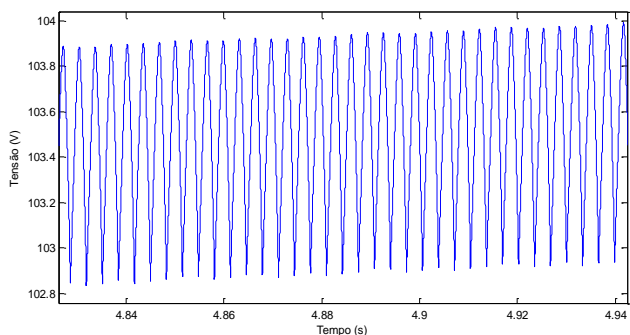
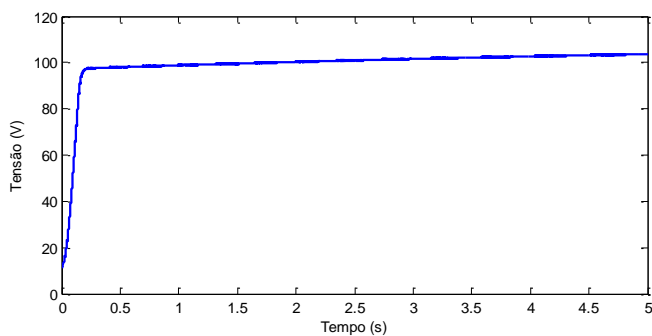


Fig. 12. Tensão medida nos terminais da carga durante transitório (a), e em regime permanente (b).

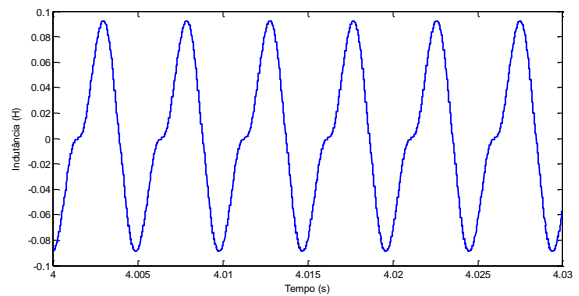


Fig. 13. Indutância da fase A.

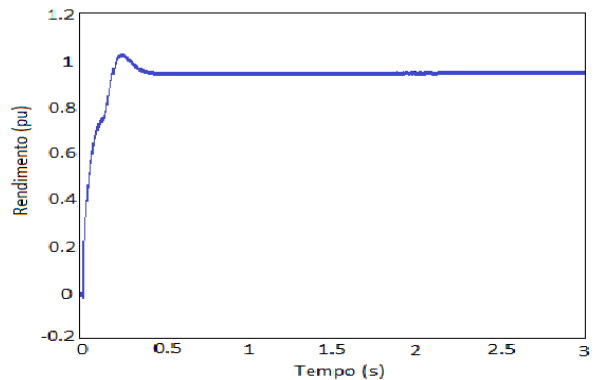


Fig. 14. Rendimento do gerador.

O gerador à relutância variável auto excitado mostra-se muito eficaz, com um alto rendimento como é descrito na curva do rendimento que é mostrada na figura 14, onde este é de 92%.

Além dos gráficos que mostram o comportamento do GRV auto excitado, foi desenvolvida uma análise sobre o rendimento desta máquina operando com diferentes velocidades. Através da figura 15 pode ser observada a eficácia da máquina neste tipo de operação, em que o rendimento é mantido praticamente constante, tanto em alta ou baixa velocidade. Isso mostra que a MRV deve ser utilizada como gerador em atividades onde esse tipo de característica é observado, tais como geração eólica, carros elétricos e aeronaves.

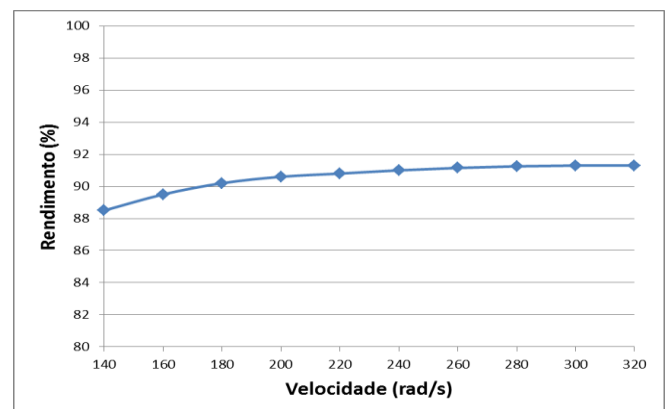


Fig. 15. Rendimento do gerador em velocidades variáveis.

III. CONCLUSÃO

Atualmente o planeta está carente de recursos naturais, pois os seres humanos têm agido irracionalmente quanto ao uso destes. O mais sensato a ser feito a partir de agora é tomar como princípio a sustentabilidade e o investimento em novas tecnologias. Por essa razão o estudo realizado neste artigo é de suma importância, já que o gerador à relutância variável desde o princípio possui características construtivas e operacionais favoráveis a essa questão.

Neste artigo primeiramente foram estudadas as características da máquina para a execução de um plano de como o gerador seria acionado. Após essa decisão foram desenvolvidos cálculos analíticos a fim de encontrar a matriz de estados que representasse o GRV no MatLab/Simulink®.

Para o acionamento do gerador foi utilizado o conversor eletrônico *half bridge*, com o qual foi desenvolvida uma técnica de variação do Ângulo de disparo para uma melhor utilização do potencial do gerador, e melhor controle de tensão.

Após a simulação pôde ser verificado que o gerador possui um rendimento ótimo e praticamente constante em velocidades variáveis, sendo possível sua utilização em aeronaves, carros elétricos e geração eólica. Experimentos em bancada com um GRV similar ao que foi simulado serão realizados futuramente para a confirmação das características de corrente, tensão e rendimento já apresentadas neste artigo.

AGRADECIMENTOS

À Deus por me dar força e sabedoria para a realização deste artigo.

Aos meus pais pelo apoio familiar.

Aos professores e colegas que apoiaram e incentivaram a realizar a pesquisa.

À Universidade Federal de Uberlândia pela estrutura disponibilizada, ao CNPq e a Pró Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

- [1] SOTELO, G. G.; ROLIM, L. G. B.; FERREIRA, A. C. Uso de uma máquina de relutância variável para armazenamento energético: uma aplicação para qualidade de energia. Disponível em: <http://www.coe.ufrj.br/~sotelo/Paulo_Branco/Flywheel_CBA02_604.pdf>. Acesso em: 08/01/2014.
- [2] FITZGERALD, A.E.; KINGSLEY, C. Jr.; UMANS, S. D. Máquinas elétricas. 6ª Edição, Bookman, 2006.
- [3] HWANG, G. R., (2002). Modelagem da máquina a relutância chaveada incluindo a saturação, Dissertação, Universidade Federal de Uberlândia.
- [4] VIAJANTE, G. P.; Silveira, A. W. F. V.; Bernardeli V. R.; et al. Estratégia para melhoria da eficiência da conversão eletromecânica de energia do GRV, Eletrônica de Potência, Campo Grande, v. 16, n.4, p. 367-375, set./nov. 2011.
- [5] DIAS, R. J., (2011). Motores a relutância variável 6x4 e 6x6. Estudo comparativo de operação e desempenho, Dissertação, Universidade Federal de Uberlândia.
- [6] A. V. S. Fleury, F. S. Silva; W. R. H. Araújo, D.A. Andrade, A. W. F. V. Silveira “Reduced switch count converter for switched reluctance generators” Eletrônica de Potência, Vol. 13, no. 3, Agosto 2008.
- [7] D. J. Perreault, “Automotive power generation and control”. IEEE Transactions on power electronics, Vol. 19, no. 3, may 2004.
- [8] B. Fahimi, et. al., “A switched reluctance machine-based starter/alternator for more electric cars” Transactions on Energy Conversion, Vol. 19, no. 1., March 2004.
- [9] Bernardeli, V. R.; Andrade, D. A.; Silveira, A. W. F. V.; et al. Gerador a relutância variável auto-excitado.
- [10] K. M. Rahman, B. Fahimi, et. al., “Advantages of switched reluctance motor applications to EV and HEV: Design and control issues,” IEEE Transactions on Industry Appli., Vol. 36, pp. 119-121, Jan./ Feb. 2000.
- [11] S. R. MacMinn and W. D. Jones, “A very high speed switched-reluctance starter-generator for aircraft engine applications” in Proc. IEEE Aerospace. And Electron. Conf., Vol. 4, pp. 1758-1764, 1989.
- [12] W. Cai, “Comparison and review of electric machines for integrated starter alternator applications”, IEEE-IAS, 2004.
- [13] P. Zhang, S. S. Williamson, “Recent status and future prospects of integrated starter-generator based hybrid electric vehicles” IEEE-VPPC, 2008.
- [14] J. G. W. West, “DC, induction, reluctance and PM motors for electric vehicles” Power engineering journal, Vol. 8, Issue: 2, 1994.
- [15] eZdspTM F28335 TechnicalReference, SPECTRUM DIGITAL, Novembro de 2007, [HTTP://www.spectrumdigital.com](http://www.spectrumdigital.com), acesso em 06/06/2013.
- [16] SILVEIRA, A. W. F. V.; ANDRADE, D. A.; FLEURI, Augusto A.; Gomes, L.C.; BISSOCHI JR, C. A.; DIAS, R. J. Voltage control in starter/generator SRM based systems. In: IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, 2009, San Jose - CA. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. New York: IEEE, 2009. p. 2460-2465.
- [17] BERNADELLI, V. R.; ANDRADE, D. A.; SILVEIRA, A. W. F. V.; GOMES, L. C.; CARVALHO, W. J.; CARVALHO, D. P.; BISSOCHI JR, C. A. Proposta de Estratégia para Melhoria do Perfil de Conjugado de Motores a Relutância Variável. In: Congresso Brasileiro de Automática, 2008, Juiz de Fora. Anais do XVII Congresso Brasileiro de Automática. Juiz de Fora: Universidade Federal de Juiz de Fora, 2008. v. 01.