

PROPOSTA DE CONTROLE DE TENSÃO GERADA APLICADA A UM SISTEMA DE GERAÇÃO UTILIZANDO A MÁQUINA A RELUTÂNCIA VARIÁVEL OPERANDO NO MODO AUTO-EXCITADO

V. R. Bernardeli, D. A. Andrade, A. W. F. V. Silveira, L. C. Gomes, G. P. Viajante, M.A.A.Freitas*, C. A. Bissochi Júnior

Laboratório de Acionamentos Elétricos da Universidade Federal de Uberlândia
Campus Santa Mônica, Uberlândia – MG, Brasil
eng.vitao@gmail.com, darizon@ufu.br

*Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás

Resumo - Neste artigo é apresentado uma estratégia de controle de tensão gerada de um sistema de geração utilizando a máquina a relutância variável operação no modo auto-excitado, compreendendo o gerador propriamente dito, o conversor, capacitor e controlador de tensão. O artigo explora a estratégia de controle de tensão baseado nos ajustes dos ângulos de chaveamento. A representação por diagrama de blocos do sistema de controle é apresentado, juntamente com a representação em matriz de estados da máquina a relutância variável, que inclui em seu modelo a saturação do circuito magnético. O conjunto completo é simulado e os resultados das simulações são apresentados e discutidos.

Palavras-Chave – Auto-excitado, Controle de Tensão, Máquina a Relutância Variável

A CONTROL STRATEGY OF VOLTAGE GENERATED BY A GENERATING SYSTEM USING A SWITCHED RELUCTANCE MACHINE OPERATING IN SELF-EXCITED MODE

Abstract - This paper presents a control strategy of voltage generated by a generating system using a switched reluctance machine operating in self-excited mode, including the generator, the drive, voltage controller and capacitor. The paper explores the voltage control strategy based on the settings of switching angles. The block diagram representation of the control system is presented, with the matrix representation of states, which includes core magnetic saturation. The complete set is simulated and the results are presented and discussed.

Keywords - Self-Excited, Voltage Control, Switched Reluctance Machine

I. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, os sistemas de acionamento de máquinas elétricas evoluíram de forma rápida, apresentando significativos avanços em eficiência e controlabilidade. Neste contexto, novos tipos máquinas elétricas passaram a fazer parte do conjunto de alternativas disponíveis [14].

Neste meio se encontram as máquinas à relutância variável (MRV).

A exemplo de outros conversores eletromecânicos tradicionais, a máquina a relutância variável pode operar com fluxo bidirecional de energia, isto é, convertendo energia elétrica em mecânica (motor) ou convertendo energia mecânica em elétrica (gerador). O modo de operação é definido pelo sincronismo entre a corrente na fase e a taxa de variação da indutância respectiva com a posição do rotor. Quando há corrente na fase e a derivada da indutância em relação à posição do rotor é negativa, a máquina opera como gerador. Na presença de corrente quando a derivada é positiva opera como motor. O controle do modo de operação é simples, pois basta governar adequadamente os períodos de condução de cada fase da máquina. O gerador à relutância variável (GRV) destaca-se por sua robustez, baixo custo de produção e manutenção, alta confiabilidade [1], [5], e inerente adequação a sistemas que operam com velocidades variáveis, se comparado a outros tipos de geradores como, por exemplo, o gerador síncrono imã permanente (GSIP).

A MRV compete com as máquinas AC tradicionais em aplicações que envolvem velocidades variáveis, seja operando como motor ou como gerador [2], [3]. Por exemplo, a energização das fases da máquina a relutância variável é realizada por fase sucessivamente gerando assim mais confiabilidade no que diz respeito a tolerância a falta de fase, quando uma fase é desligada as outras continuam operando independentemente [13], [14].

Esta característica oferece uma grande vantagem em relação às máquinas convencionais, quando usada como gerador [6]. No entanto, o primeiro problema encontrado para utilizar a máquina como gerador é que a máquina é inerentemente passiva e não tem a capacidade de auto excitação necessitando assim de uma fonte de potência para tal. Como consequência disso há um aumento da sua complexidade e diminuição da sua confiabilidade.

São possíveis duas estratégias para excitar o GRV [14], A primeira consiste em colocar uma fonte externa de corrente contínua com uma tensão fixa [8], [9], [13], denominada configuração do tipo excitação independente e a outra consiste na estratégia de auto excitação. Dentro da estratégia de auto-excitação existem duas formas: uma com o capacitor em paralelo com o enrolamento da máquina, este tipo de estratégia gera tensão e corrente contínua e será utilizada no presente trabalho, e a outra com o capacitor em série com o enrolamento da máquina, sendo que esta estratégia é utilizada para produzir tensões e correntes alternadas [1], [6], [7].

O presente trabalho apresenta uma proposta de controle de tensão gerada aplicada a máquina a relutância variável operando como gerador auto-excitado, a estratégia consiste na variação dos ângulos de magnetização da máquina, esta estratégia não é nova já existem trabalhos publicados aplicado ao gerador operando com excitação independente, mais, para o gerador operando no modo auto-excitado não existem publicações, sendo que está é a principal contribuição do trabalho.

II. MODELAGEM DINÂMICA DA MÁQUINA A RELUTÂNCIA VARIÁVEL INCLUINDO A SATURAÇÃO

Uma das características básicas da máquina a relutância variável é a ausência de enrolamentos no rotor e estrutura de pólos salientes. Do ponto de vista de acionamento, a MRV é possível trabalhar como motor ou gerador, com pequenas modificações no conversor e alterando o ângulo de chaveamento da mesma, como por exemplo: 1) para trabalhar como motor energiza-se a fase no instante em que a derivada da indutância da fase em relação à posição é positiva ou crescente, 2) para operá-la como gerador aplicam-se os pulsos de corrente nas fases no instante em que a derivada é negativa ou decrescente.

Para acionar a MRV operando no modo auto-excitado é imprescindível a utilização de dispositivos armazenadores de energia para excitação da máquina, essa energia pode ser na forma de campo elétrico (capacitor em paralelo ou em série com a carga) ou de campo magnéticos através da adição imãs permanentes no estator. O presente trabalho utiliza um capacitor em paralelo com a carga para prover essa excitação.

O circuito elétrico de uma fase do GRV pode ser equacionado como:

$$v = Ri + \frac{d\lambda(i, \theta)}{dt} \quad (1)$$

Para uma velocidade constante, a equação da tensão na fase pode ser escrita como:

$$v = ri + L(i, \theta) \frac{di}{dt} + e \quad (2)$$

onde v é a tensão aplicada, i é a corrente da fase, R é a resistência da fase, L é a indutância incremental (dinâmica) da fase e θ é a posição do rotor. Denomina-se indutância no trabalho o valor de indutância em função da posição, a variação dessa mesma indutância para diferentes valores de posição e de corrente passa a ser chamado de indutância incremental.

A indutância incremental é dada pela seguinte equação:

$$L(i, \theta) = \frac{1}{G} \sum_{j=1}^m (l_{(j+1)}(i, \alpha_j) + l_j(i, \alpha_j)) (\alpha_{(j+1)} - \alpha_j) + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\sum_{j=1}^m (l_{(j+1)}(i) A_{(j,n)} - l_j(i) B_{(j,n)}) \right) \cos(nP_r \theta)$$

O terceiro termo do lado direito da igualdade da equação 2 é a força contraeletromotriz e , que isoladamente pode ser escrita como:

$$e = i \omega \frac{dL(i, \theta)}{d\theta} \quad (4)$$

Onde, $\omega = d\theta/dt$ é a velocidade angular do rotor.

O conjugado mecânico produzido pelo GRV, pode ser expresso por (5).

$$T_e = \frac{\partial W'(i, \theta)}{\partial(\theta)} \quad (5)$$

onde $W'(i, \theta)$ é a co-energia dada por,

$$W'(i, \theta) = \int_0^i \lambda(i, \theta) di \quad (6)$$

Para realização da modelagem matemática usada no programa de simulação, o conjugado mecânico produzido pela máquina foi calculado levando em consideração as perdas por atrito viscoso D e momento de inércia J , conforme apresentado pela equação (7).

$$T_m = T_{emag} - J \frac{d\omega}{dt} - D\omega \quad (7)$$

Designando por $[V]$, $[R]$, $[I]$, $[L]$ e $[I]$ as matrizes na ordem em que aparecem em (Silveira, 2010), a matriz de estados do GRV tem a seguinte forma:

$$\dot{[I]} = [L]^{-1}[V] - [L]^{-1}[R][I] \quad (8)$$

No presente trabalho é utilizado para representar a indutância incremental a série de Fourier [10], essa representação não será mostrada no trabalho, devido já ter sido publicada em trabalhos anteriores [10], [14]. A grande vantagem da utilização deste modelo é que permite simular computacionalmente a operação dinâmica do GRV operando no modo auto-excitado.

III. ESTRATÉGIA DE CHAVEAMENTO PARA OPERAÇÃO E CONTROLE DO GERADOR

Nesta seção é dada ênfase na estratégia de chaveamento para operação e controle do gerador operando no modo auto-excitado.

a. Modelo do conversor

A figura 1 mostra o conversor trifásico do tipo *half-bridge* (HB) largamente utilizado para acionar motor e adaptado para acionar o GRV. As etapas do conversor são divididas em três para cada fase do gerador: excitação, roda-livre e geração, e serão descritas a seguir.

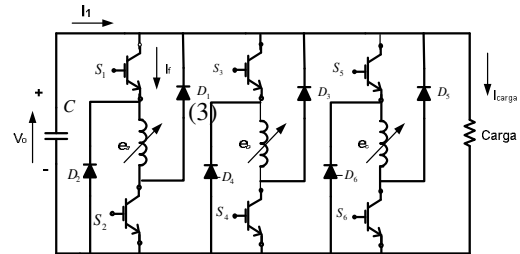


Fig. 1. Diagrama esquemático do conversor HB.

Etapa I - Excitação

Nesta etapa o capacitor C está inicialmente carregado com uma tensão inicial V_0 , conforme mostra a figura 2(a). Esta tensão é responsável por gerar o fluxo magnético inicial no enrolamento da máquina, sendo que nesta etapa o processo de excitação é iniciado com a fase A. Este caminho é visto pela figura e está em negrito, onde a chave S_1 e S_2 estão fechadas.

Etapa II – Roda livre

A criação da etapa de roda livre no circuito é dado pela abertura da chave S_1 . Nesta etapa o fluxo de energia circula através do diodo D_2 e da chave S_2 de acordo com a Figura 2(b). A corrente na fase continua sendo incrementada através da força contra eletromotriz. Assim, nenhuma corrente é solicitada do capacitor e a energia acrescida ao indutor é proveniente apenas da conversão eletromecânica.

Etapa III – Geração

Nesta etapa as chaves 1 e 2 são abertas de modo que a energia armazenada no enrolamento da fase através da excitação e do processo de conversão mecânica/elétrica. Esta corrente I_{fase} conforme pode ser observada pela figura 2(c), parte dela é entregue a carga (I_1) e a outra parte da corrente carrega o capacitor I_c .

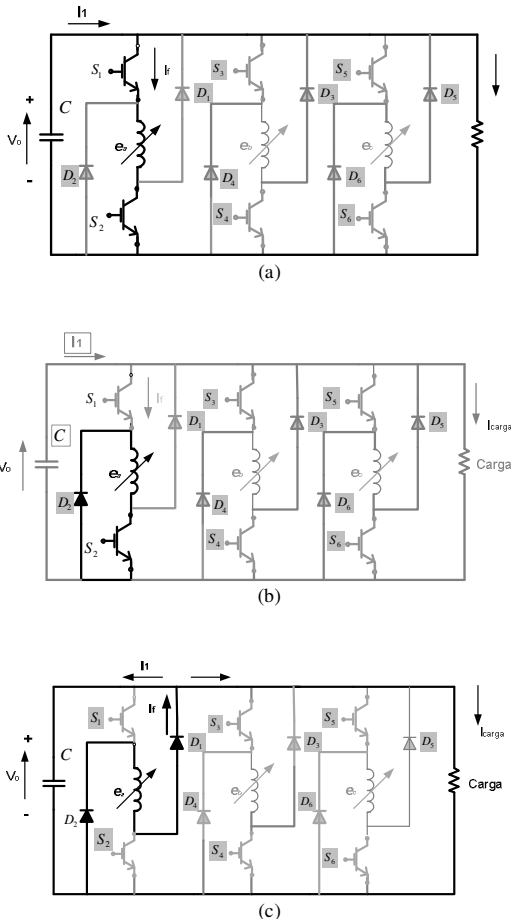


Fig. 2. Região de excitação (a), Região de roda livre intermediária (b) e Região de roda livre de geração (c).

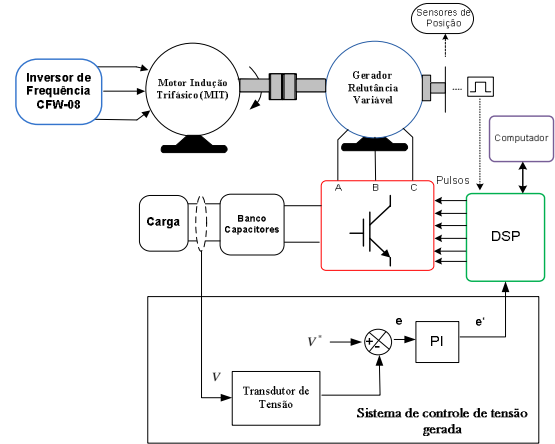


Fig. 3. Representação em diagrama de blocos do sistema completo

Todas as etapas se repetem para as fases B e C e não serão mostradas.

b. Sistema de controle de tensão

Para operação em malha fechada com controle da tensão gerada, foi desenvolvida uma estratégia que consiste na variação da largura do período de magnetização das fases, mantendo θ_{on} fixo e alterando o valor de θ_{off} (ângulo de abertura das chaves) através de um controlador PI. A grande vantagem desta estratégia é que a atuação do controlador é realizada apenas na chave superior do conversor. A chave inferior é mantida em condução até que os 30° sejam completados para permitir que a etapa intermediária de roda livre ocorra entre as etapas de magnetização e desmagnetização das fases. Em seguida a chave inferior do conversor é aberta, fazendo que a energia armazenada na bobina da fase seja entregue à carga. A representação em diagrama de blocos do sistema completo é mostrado na figura 3.

No sistema de acionamento proposto mostrado na figura 3, o controlador de tensão é constituído de uma malha de realimentação de tensão, uma tensão de referência V^* e um controlador que é do tipo PI (Proporcional e Integral). A equação 9 representa o modelo matemático do controlador PI.

$$e = K_p(V^* - V) + K_i \frac{1}{s} \cdot (V^* - V) \quad (9)$$

O controlador compara o valor de referência V^* com a tensão medida através do transdutor V , determinando o erro de tensão e produzindo um sinal de controle e que é o erro compensado.

A integração é feita de forma discreta utilizando o método trapezoidal dada por:

$$U_{k+1} = U_k + \frac{T_s}{2} (I_k + I_{k+1}) \quad (11)$$

onde:

U_{K+1} = Saída do integrador

T_s = tempo de amostragem

I_{K+1} = entrada do integrador

I_K = entrada na amostragem anterior

U_{K+1} = Saída na amostragem anterior

Na próxima seção são apresentados os resultados de simulação obtidos com o modelo desenvolvido, nestes resultados o conversor foi montado utilizando as chaves, diodos e capacitor do ambiente *Simpowersystem*, o modelo do gerador foi montado através de equações de estados utilizando a função *S-Function* do MatLab. Todos estes blocos são iterativos de forma que é possível representar os dados simulados bem próximos dos dados reais do gerador.

IV. RESULTADO DE SIMULAÇÃO

Nesta seção, serão apresentados resultados de simulação do gerador operando no modo auto-excitado. Os resultados mostrados na sequência foram obtidos através do programa Matlab/Simulink®. O programa foi usado para desenvolver a simulação de uma máquina a relutância variável 6/4 operando como gerador. O conversor usado para acionar a máquina é do tipo HB, mostrado na figura 1 com todas as etapas descritas anteriormente.

A simulação foi baseada em um protótipo real, com seis saliências no estator e quatro no rotor (6/4), construído para testes em bancada experimental. Portanto os parâmetros, perfil de indutância, limites de corrente, foram ajustados para representar a máquina. Todos os parâmetros do protótipo são mostrados em anexo.

a) Operação em malha aberta

A fim de verificar a praticidade da estratégia de chaveamento com roda livre intermediária, foram realizadas simulações com o conversor operando com chaveamento clássico, ou seja, sem a etapa intermediária de roda livre. A situação simulada foi a operação do gerador com uma velocidade de 1800 rpm, θ_{on} (ângulo de fechamento das chaves) fixo em -3° em relação a posição de alinhamento e θ_{off} (ângulo de abertura das chaves) fixo em 30° , a necessidade da magnetização antes do período de alinhamento é devido ao aproveitamento da máxima potência no instante de alinhamento do rotor com o estator. A carga ligada nos terminais do gerador foi de 60Ω puramente resistiva.

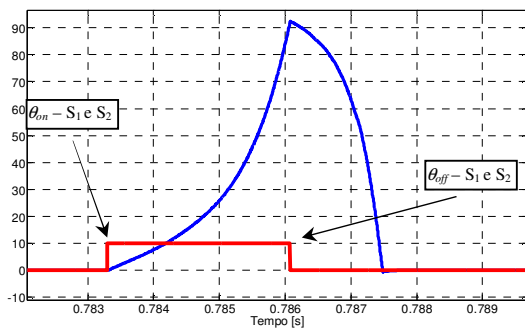


Fig. 4. Operação sem roda livre intermediária. Corrente da Fase A e Pulsos S_1 e S_2 .

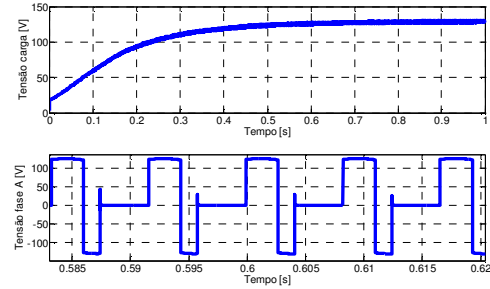


Fig. 5 : Tensão na carga.

A figura 4 mostra o perfil de corrente da fase A do gerador operando sem controle de tensão, ou seja, esta tensão torna-se estável após a saturação do circuito magnético para um dado fluxo máximo, a figura também apresenta o instante de abertura das chaves S_1 e S_2 mostrando que não existe controle nenhum do sistema. A figura 5(a) mostra o transitório de tensão gerada (escorvamento), este transitório mostra o momento de operação instável até o regime permanente. A figura 5(b) mostra a tensão na fase A para a situação mostrada em regime permanente.

b) Operação em malha fechada

Os testes de simulação em malha fechada foram realizados com os seguintes critérios: o gerador operou em malha fechada utilizando a estratégia descrita na seção 2, tensão inicial do capacitor para início da operação no modo auto-excitado foi de 20V, tensão de referência do controlador em 100V e velocidade da máquina primária fixa em 1800 rpm. A máquina foi simulada durante 1 segundo. Foi submetida a uma carga de 60Ω nos terminais do gerador

A figura 6 mostra o comportamento da corrente da fase A do gerador para o sistema de controle proposto, neste mesmo intervalo é possível também observar na figura os pulsos da chave superior e inferior, mostrando que o pulso da chave inferior permanece ligado e da chave superior no intervalo de referência do controlador o pulso é aberto.

A Figura 7(a) mostra o comportamento da tensão gerada aplicada à carga em regime transitório.

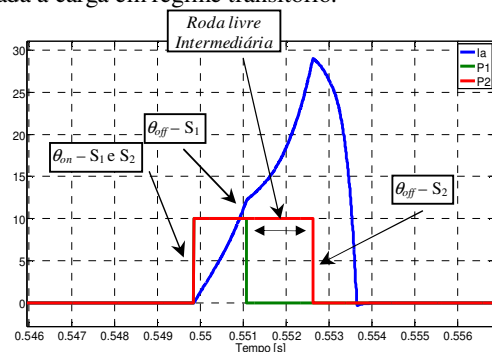


Fig. 6. Operação com roda livre intermediária. Corrente da Fase A e Pulsos S_1 e S_2 .

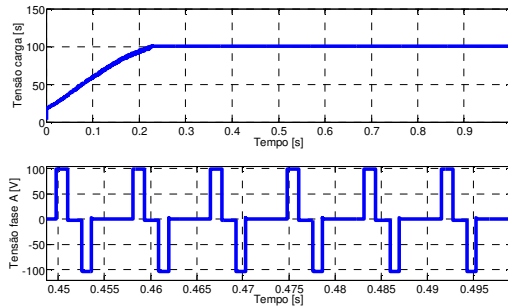


Fig. 7: Tensão na carga.

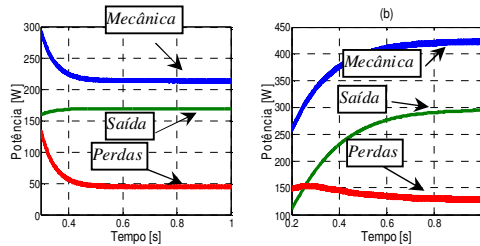


Fig. 8. a) Potências mecânica, perda e saída com roda livre intermediária, b) Potências mecânica, perda e saída sem roda livre intermediária

Observa-se que o valor de referência (100 V) foi devidamente mantido. Este teste demonstrou que o controle foi capaz de manter fixa a tensão na carga. A figura 7(b) mostra a tensão na fase A do gerador e observa-se que para o gerador controlado utiliza-se menos energia para a excitação da máquina.

TABELA I

Rendimento do GRV

Estratégia	Com Roda Livre	Sem Roda Livre
$P_{Mecânica}$ (W)	191,5	423
$P_{Saída}$ (W)	169,7	294
Perdas (W)	21,8	129
η (%)	88,6	67,13

As curvas de potência de entrada (mecânica), perdas e de saída do GRV, durante a atuação do controle de tensão gerada, podem ser observadas na Figura 8(a). Quando o mesmo teste é realizado com a atuação do controle de tensão, mas sem a etapa intermediária de roda livre, as curvas de potência ficam conforme a Figura 8(b). A Tabela I apresenta o rendimento e os valores de potência do GRV para as duas situações. Os rendimentos são diferentes, a adição da etapa de roda livre intermediária aproveita menos energia mecânica isto ocorre devido os níveis de saturação do circuito magnético ser menor, com isso as perdas são menores esta estratégia torna-se muito importante para o processo de conversão eletromecânica para este tipo de máquina e sua operação no modo auto-excitado.

V. CONCLUSÃO

Neste trabalho é apresentada uma proposta de controle de tensão gerada aplicado ao gerador a relutância variável operando no modo auto-excitado. A estratégia adotada utiliza a variação dos ângulos de magnetização juntamente com um controlado PI para variação desses ângulos. Um sistema de controle foi apresentado e simulado a fim de verificar o funcionamento da estratégia utilizada. O sistema de controle foi testado com uma referência e o sistema conseguiu manter a tensão fixa na carga. Resultados de simulação em ambiente MatLab com controle de tensão e sem controle de tensão são apresentados e discutidos.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à FAPEMIG (APQ-0502) e a CAPES pelo apoio financeiro, e à Universidade Federal de Uberlândia pela infra-estrutura disponibilizada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] N. Radimov, N. Ben-Hail, R. Rabinovici "Switched Reluctance Machines as Three-Phase AC Autonomous Generator", *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 42, no. 11, pp. 3760-3764, November 2006.
- [2] W. Cai, "Comparison and review of electric machines for integrated starter alternator applications", *IEEE-IAS*, 2004.
- [3] P. Zhang, S. S. Williamson, "Recent status and future prospects of integrated starter-generator based hybrid electric vehicles" *IEEE-VPPC*, 2008.
- [4] I. Kioskeridis, C. Mademlis "Optimal Efficiency Control of Switched Reluctance Generators", *IEEE Transaction on Power Electronics*, vol. 21, no. 4, pp. 1062-1072, July 2006.
- [5] T. J. E. Miller, "Electronic Control of Switched Reluctance Machines", *Newnes Power Engineering Series*, Oxford, 2001.
- [6] T. Matsuo, J. Luo, E. P. Hoffman, T. A. Lipo N. Radimov, N. Ben-Hail, R. Rabinovici "Self Excited Variable Reluctance Generator", *IEEE Industry Application Society*, New Orleans, Louisiana, October 5-9, 1997.
- [7] A. Martínez, J. Vina, F. Perez, E. Laloya, B. Martín, T. Pollán, B. Sánchez, J. Laladó "Steady-State Behavior of an AC Autonomous Switched Reluctance Generator", *IEEE Power Electronics Specialists Conference PESC*, Rhodes, June 15-19, 2008.
- [8] 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 - SOBRAEP*, Vol. 13, no. 3, Agosto 2008.
- [9] A. W. F. V. Silveira, D.A. Andrade, L. C. Gomes, C. A. Bissochi Jr, H. de Paula "Generated voltage control in a switched reluctance motor/generator" *Eletrônica de Potência - SOBRAEP*, Vol. 15, No.3., 2010.

- [10] Andrade, D. A., Krishnan, R. "Characterization of Switched Reluctance Machines Using Fourier Series Approach" in Proc. *36th IEEE Ind. Appl. Annu. Meeting*, Sep. 2001, pp. 48-54.
- [11] V. R. Bernardeli, D. A. Andrade, A. W. F. V. Silveira, L. C. Gomes, G. P. Viajante, L.G.Cabral "Self-Excited Switched Reluctance Generator" *XI Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência - COBEP*, 2011.
- [12] E. S. L. Oliveira, A. Coelho, M. L. Aguiar, M. Suetake "Investigation on Single-phase Switched Reluctance Generator Under Variable Speed" *XI Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência - COBEP*, 2011.
- [13] Viajante, G.P., Andrade, D. A., Silveira, A. W. F. V., Bernardeli, V. R., Gomes, L. C., Freitas, M. A. A., Domingos, J. L., Fleury, A. "Estratégia para melhoria da eficiência da conversão eletromecânica de energia do GRV" *Eletrônica de Potência*, Vol. 16, No. 4, 2011.
- [14] V. R. Bernardeli, D. A. Andrade, A. W. F. V. Silveira, L. C. Gomes, G. P. Viajante. "Gerador a Relutância Variável Operando no Modo Auto-excitado" *Eletrônica de Potência*, Vol. 16, No. 4, 2011.

ANEXO

Tabela I
Características da MRV

Parâmetros	Valor
Ângulo de Condução	30 graus
Atrito Viscoso	0.026 N.m.s
Culatra do Estator	12 mm
Culatra Rotor	12,4 mm
Comprimento da pilha laminada	107 mm
Dentes do Estator	22,5 mm
Dentes do Rotor	11,7 mm
Diâmetro do Estator	140 mm
Diâmetro do Rotor	70 mm
Gap de Ar	0,4 mm
Indutância (posição alinhada)	36 mH
Indutância (posição desalinhada)	3 mH
Largura dos dentes do Estator	19 mm
Largura dos dentes do Rotor	20 mm
Momento de Inércia	0,0028 kg.m ²
Número de espiras por fase	100 volta/fase