



**SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

GCQ-06
19 a 24 Outubro de 2003
Uberlândia - Minas Gerais

**GRUPO XIII
GRUPO DE ESTUDO DE INTERFERÊNCIAS, COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA E QUALIDADE DE
ENERGIA - GCQ**

**COMPENSADOR DINÂMICO DE AFUNDAMENTO DE TENSÃO
COM ARMAZENAMENTO CINÉTICO DE ENERGIA**

**José Luiz da Silva Neto*
Luís Guilherme Barbosa Rolim
Rubens de Andrade Jr.
DEE/UFRJ**

**Antônio Carlos Ferreira
Guilherme Gonçalves Sotelo**

COPPE-Elétrica/UFRJ

RESUMO

Neste artigo simula-se o funcionamento de um compensador dinâmico série de afundamento de tensão tendo um armazenador cinético de energia supercondutor como fonte de potência ativa. Este armazenador cinético de energia utiliza máquina de relutância variável como motor/gerador. São apresentados os circuitos de potência projetados e as estratégias de controle para o acionamento do compensador e da máquina de relutância variável. Os resultados das simulações confirmam a viabilidade deste sistema para uso em sistemas de distribuição de energia elétrica.

PALAVRAS-CHAVE

Armazenamento de energia. Restaurador dinâmico de tensão. Qualidade de energia. Afundamento de tensão.

1.0 - INTRODUÇÃO

Afundamentos de tensão no sistema de distribuição de energia elétrica podem danificar ou tirar de serviço cargas sensíveis, que são cada vez mais comuns devido ao alto nível de automatização dos sistemas industriais, causando graves prejuízos. Para compensar estes afundamentos de tensão pode-se usar um compensador dinâmico em série com o barramento, cuja tensão é controlada de modo a equalizar a tensão do sistema. Atualmente já são comercializados dispositivos baseados neste princípio [8], porém estes dispositivos têm de retirar do próprio barramento, a que estão conectados, a potência ativa necessária para a compensação. Sem a presença de

um sistema de armazenamento de energia, que retire energia da rede nos períodos de normalidade o sistema corre o risco de entrar em colapso.

O armazenamento de energia em volantes de inércia (*flywheels*) é uma técnica utilizada há muito tempo para a estabilização de picos de demanda de potência mecânica. Sistemas contendo um volante de inércia acoplado a um motor/gerador também têm sido utilizados para estabilização de picos de demanda de potência elétrica. Estes sistemas retiram lentamente energia da rede e armazenam no volante para depois retorná-la no pico de demanda. Os volantes de inércia mais utilizados até o momento são volantes de inércia pesados operando em baixa velocidade. Porém, a densidade de energia armazenada (energia armazenada por unidade de massa do dispositivo) nestes dispositivos é baixa. Como a energia armazenada em um volante de inércia é diretamente proporcional ao seu momento de inércia, e conseqüentemente à sua massa, e diretamente proporcional ao quadrado de sua velocidade angular, é possível aumentar a densidade de energia armazenada aumentando a velocidade de rotação do volante. Contudo, a operação de dispositivos contendo volantes de inércia em alta velocidade esbarrava no aumento das perdas devido ao atrito, na eletrônica de controle do motor/gerador e principalmente em problemas de rigidez mecânica devido à elevada velocidade tangencial do volante.

O desenvolvimento de materiais compósitos contendo fibras de vidro e carbono tem permitido a confecção de volantes de inércia de grandes dimensões capazes de operar a velocidades de 60000 rpm (com velocidade tangencial de 1 km/s), tornando densidade de energia armazenada em dispositivos de armazenamento

* DEE/EE/UFRJ, Ilha do Fundão, Cx.P. 68515, 21945-970 Rio de Janeiro, RJ, Brasil
Fone: (21)2562-8033, Fax: (21)2562-8017 - E-MAIL: luizneto@dee.ufrj.br

cinético de energia competitiva com outros dispositivos de armazenamento de energia [6][10], tais como as baterias químicas, supercapacitores e SMES (Superconducting Magnetic Energy Storage). As perdas devido ao atrito viscoso do ar são minimizadas com o sistema operando em vácuo e o desenvolvimento atual da eletrônica de potência permite o controle reversível do modo de operação (motor ou gerador) de máquinas elétricas de alta velocidade. As perdas de fricção dos mancais podem ser minimizadas utilizando-se mancais magnéticos ativos, mancais magnéticos passivos estabilizados por mancais mecânicos de alto desempenho ou mancais magnéticos supercondutores. Mancais de escora ativos têm o inconveniente do alto consumo de energia e a necessidade de um sistema de controle próprio. Mancais mecânicos de alto desempenho são complexos e necessitam de um sistema de refrigeração especial. O principal inconveniente do mancal magnético supercondutor é a necessidade de refrigerar os supercondutores a baixa temperatura. Porém, como a dissipação de potência nos supercondutores é muito pequena [9], com um bom projeto criogênico pode-se resfriar os supercondutores com um refrigerador de ciclo fechado de baixa potência.

Desenvolve-se na UFRJ o projeto de um Armazenador Cinético de Energia Supercondutor (ACES) para uso em um compensador dinâmico de afundamento de tensão. Este ACES utiliza máquina de relutância variável (MRV) como motor/gerador. A MRV foi escolhida devido à sua robustez, perda nula na ausência de corrente de excitação e atuação eficiente tanto como motor quanto gerador em altas rotações [3].

Neste artigo simula-se o funcionamento do compensador dinâmico série de afundamento de tensão tendo o ACES conectado ao seu *link DC*. São apresentados os circuitos de potência projetados e as estratégias de controle para o acionamento do compensador e da MRV.

2.0 - MÁQUINA DE RELUTÂNCIA VARIÁVEL

O princípio de funcionamento de uma máquina de relutância variável se baseia na tendência do rotor em se deslocar para uma posição onde a relutância é mínima, a qual corresponde à posição onde a indutância da bobina excitada do estator é máxima. Entre as vantagens apresentadas pela MRV, destacam-se: oferecimento de grande robustez e custo de produção estimado reduzido. A Figura 1 apresenta uma vista em corte da MRV que foi utilizada para desenvolver o presente trabalho, a qual apresenta em sua configuração 6 pólos no estator e 4 pólos no rotor.

A simetria do circuito magnético permite que o fluxo enlaçado mútuo seja praticamente nulo, mesmo quando o motor opere sobre condições de saturação. Desta forma a indutância própria de cada fase será responsável por todo torque que for produzido pelo motor. A indutância própria de uma fase varia linearmente com a posição angular do rotor, quando o motor opera sem saturação. Já na presença de

saturação, esta relação deixa de ser linear. A figura 2 mostra uma família de perfis de indutância de uma fase –em função da posição angular do rotor– para diversos valores de corrente elétrica, que foram calculados para a máquina de relutância estudada, por meio de simulação computacional utilizando o programa comercial ANSYS®, o qual utiliza o método dos elementos finitos (MEF).

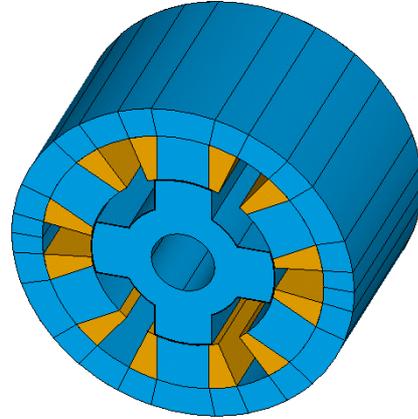


FIGURA 1 – VISTA DA MRV DE CONFIGURAÇÃO 6/4 (NUMERO DE PÓLOS DO ESTATOR E DO ROTOR, RESPECTIVAMENTE).

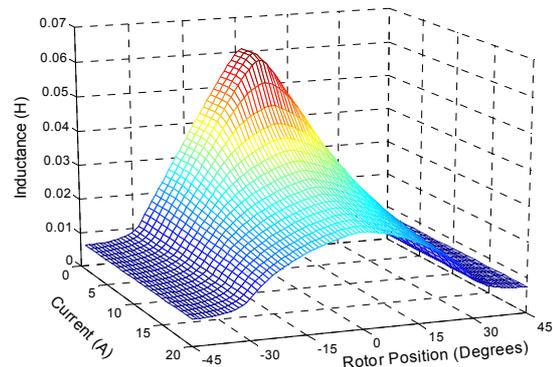


FIGURA 2 – INDUTÂNCIA DE UMA FASE DA MRV PARA CORRENTE VARIANDO ENTRE 1 E 20 A, MOSTRANDO A INFLUÊNCIA DA SATURAÇÃO DO CIRCUITO MAGNÉTICO.

O torque elétrico de uma fase do motor é dado pela expressão a seguir:

$$T_e(i) = \frac{\partial}{\partial \theta_r} \left[\int_0^i \lambda(\theta_r, i) di \right] \quad (1)$$

onde T_e é o torque, θ_r é a posição do rotor, λ é o fluxo magnético enlaçado e i representa a corrente elétrica na bobina da referida fase do estator.

2.1 Modelo Dinâmico da Máquina de Relutância Variável

As relações $T_e(\theta_r, i)$ e $\lambda(\theta_r, i)$ são fortemente não lineares, tornando difícil o desenvolvimento de um modelo analítico da MRV. Por isso, ao invés de tentar-se obter relações analíticas, a metodologia adotada neste trabalho baseia-se na utilização de dados tabulados de $T_e(\theta_r, i)$ e $\lambda(\theta_r, i)$. Estes dados, para uma determinada máquina, podem ser obtidos *off-line* seja por medidas estáticas ou cálculos através do MEF, numa faixa de valores suficientemente ampla para abranger todas as situações que possam ocorrer dentro dos limites estabelecidos para os casos simulados. As tabelas são então utilizadas diretamente na solução das equações dinâmicas elétricas e mecânicas (equações (2) e (3)) efetuando-se interpolações lineares.

$$V = r_s \cdot i + \frac{d\lambda(\theta_r, i)}{dt} \quad (2)$$

$$J \cdot \frac{d^2\theta_r}{dt^2} = T_e - T_m \quad (3)$$

onde V é a tensão sobre a bobina da fase, r_s é a resistência elétrica do enrolamento do estator, i é a corrente elétrica que flui pelas bobinas da fase em questão, J é o momento de inércia do conjunto rotor da máquina-*flywheel*, T_e é o torque elétrico e T_m é o torque mecânico, devido ao atrito dos mancais e ao atrito viscoso do ar.

3.0 - ARMAZENAMENTO CINÉTICO DE ENERGIA

Numa máquina elétrica pode-se acumular energia cinética nas suas partes girantes. Deste modo, é possível extrair energia do rotor, de forma eficiente, mesmo quando a tensão do sistema cai a valores muito baixos. Recentemente, a literatura tem apresentado exemplos de armazenadores do tipo "*flywheel*", que se utilizam deste princípio [1][5][7]. De uma maneira geral, estes sistemas se baseiam na energia armazenada em volantes de inércia com massa pequena e girando a velocidades muito elevadas ou volantes com massa elevada girando a velocidades baixas.

O armazenamento energético é dado pela rotação de um volante de inércia (*flywheel*). A máquina de relutância variável é responsável pela conversão da energia elétrica em energia mecânica, e vice versa, através da aceleração ou desaceleração angular do *flywheel*. O valor da energia cinética armazenada no *flywheel* é dado pela seguinte relação:

$$Ec = \frac{1}{2} J \omega^2 \quad (4)$$

onde Ec é a energia cinética armazenada, J é o momento de inércia e ω é a velocidade angular do volante.

A variação de velocidade angular do conjunto rotor e volante efetuada em um intervalo de tempo, Δt , leva à absorção (ou fornecimento) de uma quantidade ΔEc de energia, que será absorvida (ou fornecida) pela máquina com uma potência elétrica média dada por:

$$P = \frac{\Delta Ec}{\Delta t} = \frac{1}{2} J \frac{(\omega_2^2 - \omega_1^2)}{\Delta t} \quad (5)$$

Pela relação (4) é possível observar que o acréscimo na quantidade de energia que pode ser armazenada em um *flywheel* através de um aumento na velocidade de rotação ($\omega_{m\acute{a}x}$) é muito superior ao acréscimo que seria obtido através de um aumento de mesma proporção no momento de inércia, sem porém alterar $\omega_{m\acute{a}x}$.

Para a operação do *flywheel* em alta velocidade, entretanto, podem surgir alguns problemas, como:

- acréscimo das perdas energéticas provocadas pelo atrito mecânico existente no mancal convencional, além da limitação de velocidade que é imposta por este tipo de mancal;
- aumento do valor da frequência de chaveamento das chaves semicondutores do conversor eletrônico;
- aumento nas perdas magnéticas devido à maior frequência das correntes de estator;

As perdas magnéticas e elétricas podem ser minoradas através de uma otimização do projeto da máquina e da utilização de materiais especiais, o que pode ser justificado devido à especificidade da aplicação. O sistema que será implementado futuramente utilizará um mancal magnético supercondutor visando à redução das perdas referentes ao atrito [4]. Todo o sistema funcionará em uma câmara devidamente fechada, onde é feito vácuo da ordem de grandeza de $1 \mu\text{bar}$.

4.0 - ACIONAMENTO DA MRV

O diagrama elétrico do conversor utilizado para uma fase da MRV, pode ser visto na Figura 3. Devido ao princípio de operação da MRV, o sinal algébrico do torque produzido não depende do sentido de circulação das correntes nas bobinas, porém apenas da posição relativa entre rotor e estator, enquanto a corrente estiver circulando. Conforme ilustrado na Figura 4, se a corrente fluir por uma bobina antes de ser atingida a posição de alinhamento, será produzido torque no mesmo sentido que o de rotação, causando aceleração. Caso a corrente circule após a posição de alinhamento, o torque produzido será contrário ao sentido de rotação, provocando frenagem. Portanto, o controlador de corrente deve fazer com que o pulso de corrente aplicado em cada fase sofra um deslocamento para antes ou para depois da posição de alinhamento, de acordo com o sinal algébrico da corrente de referência. A intensidade da corrente será então controlada de modo a rastrear apenas o módulo da referência.

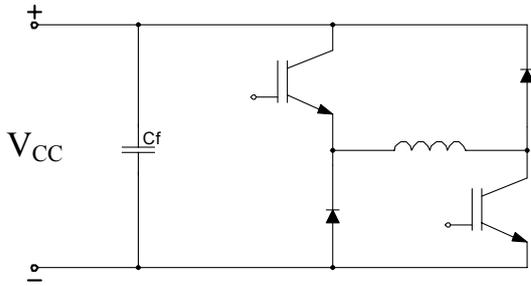


FIGURA 3 –DIAGRAMA ELÉTRICO DO CONVERSOR PARA UMA FASE DA MVR.

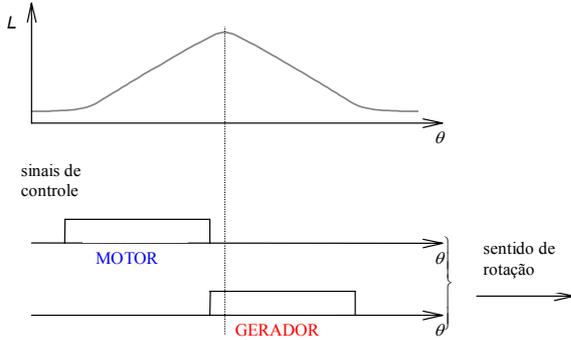


FIGURA 4 – MODOS DE OPERAÇÃO DA MRV.

5.0 - APLICAÇÃO COMO COMPENSADOR DE AFUNDAMENTOS DE TENSÃO

Um sistema com um DVR utilizando um armazenador de energia do tipo flywheel pode ser visto na Figura 5. Os componentes principais podem ser identificados: conversor de acoplamento com a rede elétrica; elo CC; conversor de acionamento da MRV; máquina de relutância variável; *flywheel*. Pode-se observar que o funcionamento do sistema baseia-se na injeção de uma tensão em série com a da rede elétrica, de modo a manter-se a tensão entregue à carga sensível regulada em seu valor nominal. Na presença de uma falta ou ligamento de uma carga de grande potência, uma corrente elétrica de módulo maior pode determinar uma queda de tensão considerável na reatância da linha.

O circuito eletrônico de potência é constituído de dois conversores. Um conversor a IGBT em meia ponte é utilizado para acionar a MRV, permitindo operação como motor ou gerador. O elo CC é conectado à rede através de um conversor PWM (*Pulse Width Modulation*), que é controlado de acordo com a teoria *pq* de Akagi [1].

5.1 Estratégia de Controle

O objetivo da operação de controle é determinar a direção do fluxo de potência. Isto é realizado regulando-se a tensão no elo CC. O controle da velocidade de rotação da MRV deve ser feito a partir das solicitações de potência ativa e/ou reativa da rede. Neste trabalho implementa-se uma estratégia de controle da rotação em dois estágios que se acoplam através de uma variável de estado, que é a tensão

sobre o capacitor do elo CC. A idéia principal é controlar a rotação da MRV diretamente a partir do desvio entre tensão do elo CC e um dado valor de referência, conforme ilustrado no diagrama de blocos da Figura 6. Quando não há solicitação de fluxo de potência entre o *flywheel* e a rede, a tensão no elo CC fica então regulada no seu valor nominal. Quando houver então tal solicitação, o controle do fluxo de potência será feito diretamente sobre o conversor de interface com a rede, através do controle de sua tensão. A Figura 6 apresenta em diagrama de blocos o esquema desta malha de controle. A potência de saída do conversor do lado da rede é dada pelo produto interno $v_{\alpha} \cdot i_{\alpha} + v_{\beta} \cdot i_{\beta}$ (tensões e correntes em coordenadas de Clark). O sentido desta potência causa variação na tensão sobre o capacitor do elo, que é compensada pela atuação do regulador PI, o qual define a operação da máquina como motor ou gerador.

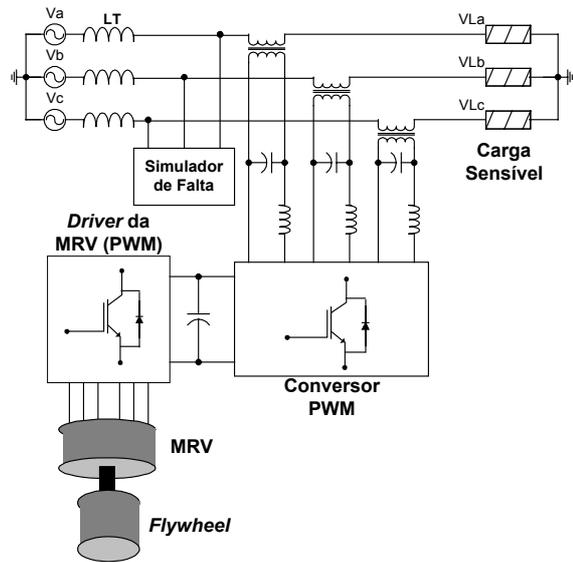


FIGURA 5 – COMPENSADOR SÉRIE COM FLYWHEEL.

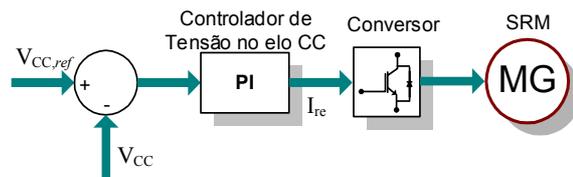


FIGURA 6 – DIAGRAMA DO CONTROLE DE TENSÃO NO ELO CC.

Uma outra malha de regulação é mostrada na Figura 7. O regulador PI desta malha tem por objetivo trazer a rotação da MRV de volta ao valor nominal, após o decaimento dos transitórios de potência. Este controlador adiciona ao conversor da rede uma pequena quantidade de potência real média ($\Delta \bar{p}$). Seu ajuste deve ser mais lento que os demais reguladores, e o seu sinal de controle deve ser limitado a valores que não provoquem drenagem excessiva de potência da rede.

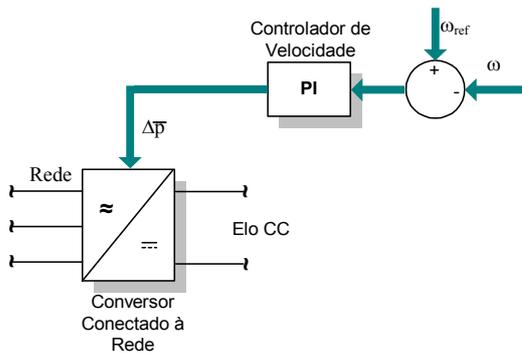


FIGURA 7 – DIAGRAMA DO CONTROLE DE TENSÃO NO ELO CC.

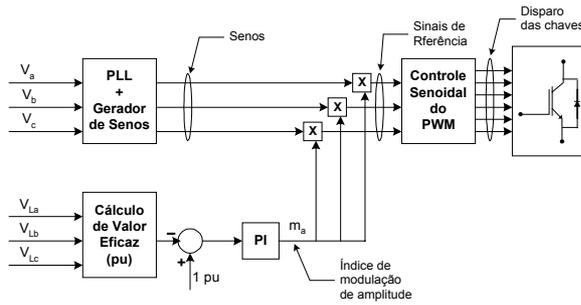


FIGURA 8 – DIAGRAMA DA COMPENSAÇÃO DE AFUNDAMENTOS DE TENSÃO.

5.2 Compensação de Afundamentos de Tensão

Neste trabalho utilizamos a estratégia de controle apresentada em [2]. A energia armazenada pode ser então rapidamente devolvida ao sistema nos momentos de grande demanda, fazendo-se o controle da tensão de saída do conversor através de um laço de realimentação cuja resposta dinâmica seja da mesma ordem de grandeza que a frequência da rede. A Figura 8 apresenta o diagrama de blocos do controle do DVR. A medição do valor eficaz (em pu) das tensões na carga é

comparada com a referência (1 pu) produzindo um sinal de erro. O erro então é entregue a um regulador PI cuja saída é o índice de modulação de amplitude (m_a) utilizado num controle PWM senoidal do conversor do lado da rede. Sinais senoidais sincronizados, por intermédio de um PLL, com as tensões na entrada do DVR são modulados por m_a produzindo as referências de tensão para o conversor.

6.0 - RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

Os parâmetros da MRV utilizados em simulação no EMTDC/PSCAD foram obtidos de medições em uma máquina existente, com a qual está sendo construído, em laboratório, um protótipo que contará com um mancal magnético supercondutor. A máquina tem potência nominal de 1.5 kW, podendo atingir 5000 rpm. O flywheel tem inércia igual a 0.065 kgm^2 . Simulou-se um caso de uma rede de 127V fase-neutro alimentando uma carga de 4.5 kW. Uma falta à montante do DVR (ver Figura 5) é aplicada em $t=0.3 \text{ s}$ com duração de 300 ms (18 ciclos), provocando um afundamento de 33%. Para esta falta a máquina opera fornecendo potência nominal. Nestas condições de potência e velocidade é necessária uma tensão de 400 V no elo CC, de modo que possam ser sintetizadas as correntes para o torque requerido. A Figura 9 apresenta as tensões (apenas uma fase) à montante e jusante do DVR. Nota-se que o equipamento opera como esperado, mantendo a tensão na carga regulada. Este fato pode ser melhor observado na Figura 10, onde é mostrado o valor eficaz das tensões na carga em comparação com a referência de 1 pu. No transitório inicial percebe-se uma variação de tensão de 7%. A Figura 11 apresenta a tensão no capacitor do elo, regulada pelo mecanismo da Figura 6. Percebe-se um transitório de amplitude bastante reduzida. Durante a falta, o conversor de interface com a rede retira energia do elo CC que é reposta pela desaceleração regenerativa da MRV.

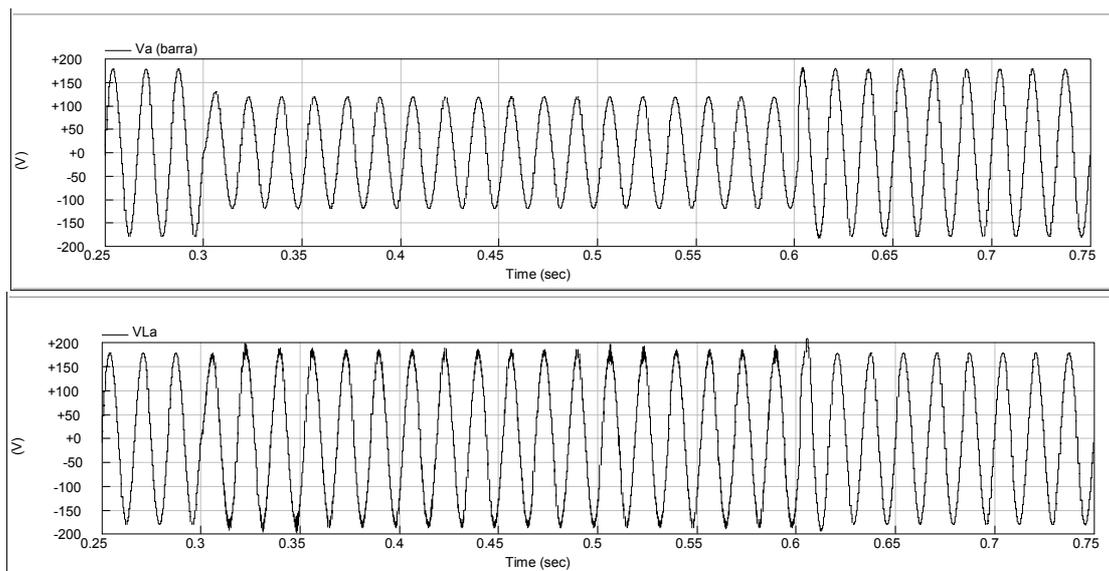


FIGURA 9– A)TENSÃO EM UMA FASE À MONTANTE DO DVR; B)TENSÃO NA MESMA FASE À JUSANTE DO DVR.

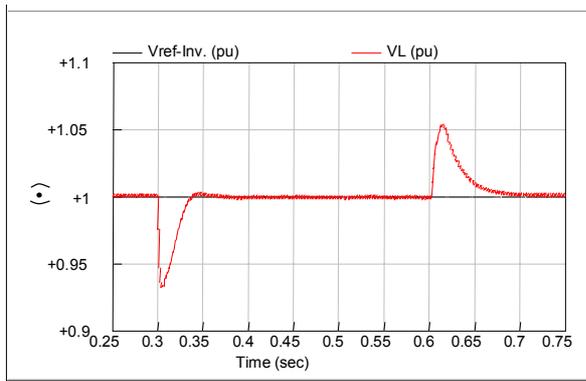


FIGURA 10 – TENSÃO EFICAZ NA CARGA E REFERÊNCIA DE TENSÃO.

Para uma carga constante a potência entregue pelo DVR é também constante. Como a máquina desacelera, o torque elétrico deve aumentar. A corrente exigida da máquina é, em consequência, progressivamente maior. O controle de corrente, no entanto, não é prejudicado, pois a diminuição da velocidade aumenta o intervalo de tempo entre ligamento e desligamento de cada fase, permitindo que as correntes possam atingir o valor de referência. Por outro lado, deve-se assegurar que as correntes fiquem abaixo do valor máximo dos enrolamentos.

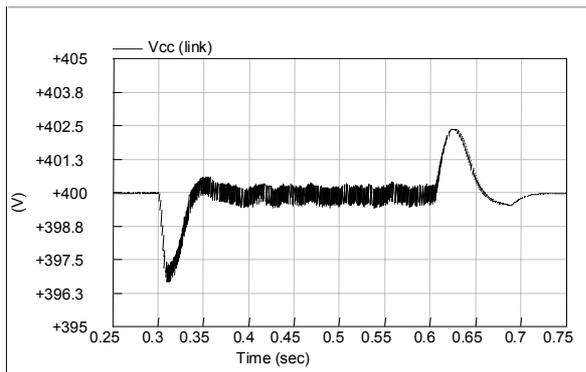


FIGURA 11 – TENSÃO NO CAPACITOR DO ELO CC.

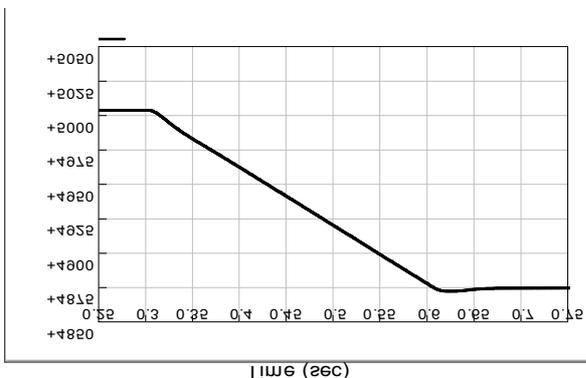


FIGURA 12 – VELOCIDADE DO EIXO DA MRV (RPM).

7.0 - CONCLUSÃO

A MRV por suas características de elevada robustez e confiabilidade, apresenta-se como uma ótima opção como motor/gerador para o armazenamento de energia na forma de energia cinética. O trabalho apresentou um compensador dinâmico para afundamentos de tensão (DVR) baseado em *flywheel*. Foram descritos os circuitos eletrônicos de potência e as estratégias de controle para o seu acionamento. Os resultados das simulações confirmam o excelente desempenho deste equipamento, e mostram que este tipo de armazenamento de energia pode ser utilizado na melhoria da qualidade de energia em sistemas elétricos.

8.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Akagi, H. (2000). Active Filters and Energy Storage Systems Operated under Non-Periodic Conditions, IEEE Summer Meeting, 2: 965-970.
- [2] Castellões, O. G. S., Aredes, M. (2001). A Series Compensator for Voltage Sags. COBEP, Brasil, 1: 372-377.
- [3] Ferreira, C. A., (1995), Jones, S. R., Heglund, W. S. and Jones, W. D., "Detailed Study of a 30-kW Switched Reluctance Starter/Generator for a Gas Turbine Engine Application", IEEE Transactions on Industry Applications 31, 553-561
- [4] Nicolsky, R. et al. (1999). Superconducting Axial Bearing for Induction Machines with Active Radial Magnetic Bearings. IEEE Transactions on Applied Superconductivity. 9(2):964-967.
- [5] Ter-Gazarian, A. (1994). Energy Storage for Power System. IEE Série 6, Grã-Bretanha.
- [6] Weissbach, R. S., Karady, G. G., Farmer, R. G. (2001). A Combined Uninterruptible Power Supply and Dynamic Voltage Compensator Using a Flywheel Energy Storage System. IEEE Transactions on Power Delivery, 16(2):265-270.
- [7] Willis, H. L. (2000). Energy Storage Opportunities related to distributed generation. IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, 3:1517-1518.
- [8] Woodley, N. H., Sezi, T. (2001). New Design Dynamic Voltage Restorer (DVRTM MV) Systems, IPEC'01 Conference, Singapore, 17-19.
- [9] Sung, T. -H., Lee, J. -S., Han, Y. H., Han, S. -C., Choi, S. -K., Kim, S. -J. (2002), 300 Wh Class Superconductor Flywheel Energy Storage System with a Horizontal Axle, Physica C 372-376, 1451-1456.
- [10] Hebner, R., Beno, J. and Walls, A. (2002), Flywheel Batteries Come Around Again, IEEE Spectrum April, 46-50.