
SISTEMAS DE GERAÇÃO BASEADOS EM GERADOR DE INDUÇÃO OPERANDO COM TENSÃO REGULADA E FREQUÊNCIA CONSTANTE

Enes Gonçalves Marra

Escola de Engenharia Elétrica - EEE
Universidade Federal de Goiás - UFG
Goiânia-GO Brasil
e-mail: enes@ieee.org

José Antenor Pomílio

Faculdade de Eng. Elétrica e de Computação - FEEC
Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP
C. P. 6101 - CEP: 13081-970 - Campinas-SP Brasil
e-mail: antenor@dsce.fee.unicamp.br

Resumo – As características elétricas de um sistema baseado em gerador de indução operando isolado da rede elétrica são melhoradas através da associação com um inversor PWM alimentado em tensão. O inversor possibilita a melhoria do comportamento do sistema em diversos aspectos: regulação de tensão, estabilização da frequência e compensação da potência reativa. A estratégia de operação do sistema consiste em fixar a frequência síncrona do gerador de indução através do inversor PWM. Para obter balanço de potência e regulação de tensão do gerador, são apresentadas duas alternativas: através da regulação da velocidade do rotor; ou enviando-se parte da energia acumulada no lado CC do inversor para rede através de linha monofásica, caso a velocidade do rotor não seja regulada e exista disponibilidade de conexão monofásica à rede. Os resultados obtidos demonstram que o sistema é estável, robusto e capaz de gerar tensões trifásicas reguladas.

INDUCTION GENERATOR BASED SYSTEMS PROVIDING REGULATED VOLTAGE WITH CONSTANT FREQUENCY

Abstract – The electrical characteristics of an isolated induction generator based system are improved through the association with a PWM voltage-source inverter. The electronic converter allows to achieve a better system behavior in many aspects: voltage regulation, frequency stabilization and reactive power compensation. The system operation strategy consists of maintaining constant synchronous frequency at the induction generator via the PWM inverter. The system power balance and the generator voltage regulation may be accomplished by two different means: through the rotor speed regulation; or sending part of the energy stored in the inverter dc side to the grid through a single-phase line, in case the rotor speed is not regulated and a single-phase grid connection is available. The results obtained shows that the system is stable, robust and an effective source of regulated three-phase voltages.

1 INTRODUÇÃO

A máquina de indução com rotor tipo gaiola (MIG) é freqüentemente comparada de modo favorável em relação aos demais tipos de máquinas elétricas por ser robusta, apresentar custos e manutenção reduzidos e possuir alta densidade de potência (W/kg). A despeito de suas vantagens, a MIG raramente é empregada como gerador, devido à sua regulação de tensão insatisfatória e à variação da frequência síncrona, mesmo quando acionada sob velocidade constante no rotor e alimentando cargas com potência totalmente ativa (Bassett e Potter, 1935; Wagner, 1939).

Este trabalho tem o objetivo de propor a utilização do gerador de indução (GI) como uma alternativa de baixo custo aos geradores síncronos empregados em sistemas de geração de baixa potência (abaixo de 50 kW), isolados da rede elétrica, tais como microcentrais hidrelétricas e geradores acionados por motores Diesel. É apresentada uma estrutura na qual a velocidade do rotor é regulada e outra estrutura com velocidade rotórica não regulada, operando como co-gerador para uma rede monofásica, como forma de manter a regulação de tensão do GI. Esta segunda estrutura é apropriada para utilização em regiões rurais ou áreas afastadas com baixa densidade de cargas, as quais geralmente são atendidas por linhas monofásicas na região centro-norte do Brasil.

Em ambos os casos o sistema deve gerar tensões trifásicas equilibradas, com frequência constante e com qualidade suficiente para alimentar cargas sensíveis, tais como equipamentos com micro-controladores.

2 GERADOR DE INDUÇÃO EXCITADO POR CAPACITORES EM OPERAÇÃO ISOLADA

A figura 1 apresenta um sistema no qual o gerador de indução, excitado por um banco trifásico de capacitores (C_{ca}), opera isolado da rede elétrica. Nestas circunstâncias, a potência ativa da carga CA influencia consideravelmente a amplitude e a frequência da tensão terminal do gerador, mesmo que a

Artigo Submetido em 25/02/1999

1a. Revisão em 30/09/1999;

Aceito sob recomendação do Ed. Consultor Prof. Dr. Edson H. Watanabe

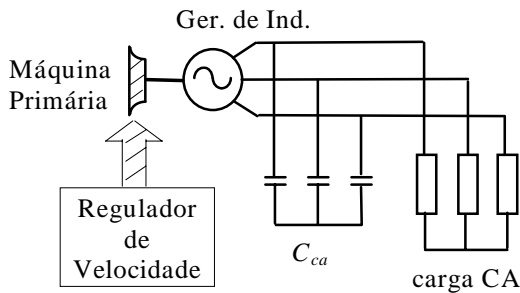


Figura 1 - GI isolado excitado por banco de capacitores.

velocidade do rotor seja mantida constante pela ação do regulador de velocidade.

Considerando-se, por simplicidade, as perdas mecânicas, elétricas e magnéticas desprezíveis, a potência elétrica convertida pelo GI é dada pelo produto entre a velocidade angular do rotor e o conjugado no eixo do gerador. Desta forma, supondo-se que a velocidade do rotor é invariável, o aumento na potência ativa da carga CA deve produzir a queda da frequência síncrona, uma vez que esta é a única maneira de elevar o conjugado, a fim de atender à nova demanda de potência da carga.

A figura 2 ilustra qualitativamente uma situação em que o GI está alimentando uma carga com fator de potência unitário. O ponto 'A' é o ponto de operação estável, cujo produto do conjugado pela velocidade do rotor equivale à potência da carga CA, desconsiderando-se as perdas. A frequência síncrona (f_s) da força magnetomotriz (FMM) do estator é igual a f_{s1} no ponto 'A'.

O ponto 'A' na característica de conjugado da figura 2, corresponde ao ponto de operação estável 'A' na característica de magnetização do GI, apresentada na figura 3.

O aumento de potência ativa na carga CA provoca queda na frequência síncrona de f_{s1} para f_{s2} , produzindo assim elevações tanto na frequência de escorregamento do rotor quanto no conjugado desenvolvido pelo gerador. Assim, a potência gerada aumenta para satisfazer a nova demanda da carga CA, conduzindo ao novo ponto estável de operação do gerador (ponto 'B'). Observe que o regulador de velocidade mantém a velocidade do rotor sempre constante em regime permanente.

A queda na frequência síncrona para o valor f_{s2} reduz a tensão terminal do GI, apresentada na característica de magnetização

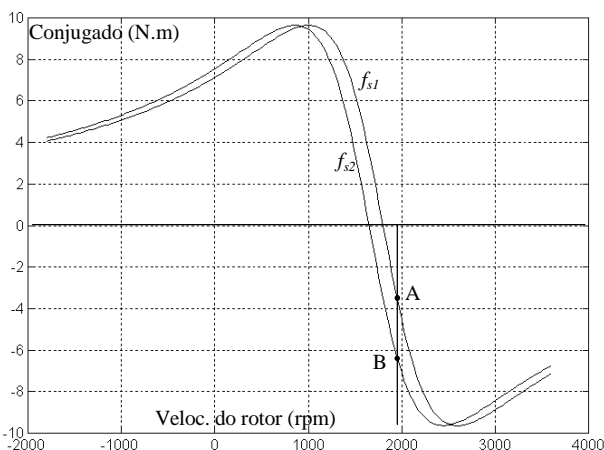


Figura 2 - Característica de conjugado do GI em função da velocidade do rotor.

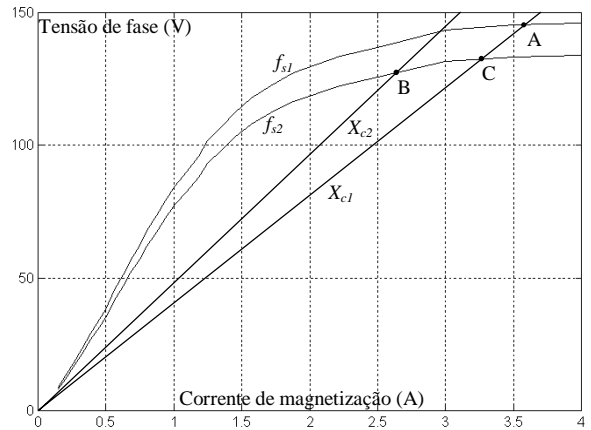


Figura 3 - Característica de magnetização do GI.

da figura 3, na mesma proporção, considerando-se que o fluxo no entreferro é mantido constante.

Além de alterar a curva característica de magnetização do gerador, a redução da frequência afeta a reatância capacitiva (X_c) do banco de capacitores C_{ca} , conforme descreve a equação 1. X_{c1} e X_{c2} correspondem às respectivas frequências f_{s1} e f_{s2} , na figura 3.

$$X_c = \frac{1}{2\pi f_s C_{ca}} \quad (1)$$

A capacitância C_{ca} pode ser elevada a fim de recuperar o valor inicial da reatância capacitiva (X_{c1}). No entanto, o ponto 'C' da curva de magnetização (figura 3) será o novo ponto de operação estável do gerador em lugar do ponto 'A', uma vez que a frequência permanece com valor f_{s2} .

A queda na tensão terminal do GI é o efeito resultante do aumento da potência ativa da carga, como resultado da influência da frequência síncrona na característica de magnetização do gerador e no valor da reatância capacitiva do banco C_{ca} .

É importante ressaltar que as quedas de tensão nas resistências e indutâncias de dispersão do estator e do rotor do GI em operação isolada não são a causa principal de sua regulação de tensão insatisfatória. A regulação de tensão do GI é afetada principalmente pela influência da frequência síncrona na característica de magnetização do gerador e pela dependência desta frequência com a potência ativa da carga CA.

No caso ilustrado nas figuras 2 e 3, a variação da tensão terminal do gerador foi analisada exclusivamente sob influência da potência ativa. No entanto, a elevação da potência reativa da carga CA, bem como a queda de velocidade do rotor com o aumento do conjugado, podem ser fatores adicionais de deterioração da regulação de tensão do gerador.

Esforços consideráveis têm sido empreendidos por longo tempo, com o objetivo de superar a regulação de tensão insatisfatória dos geradores de indução em operação isolada da rede elétrica. As investigações realizadas neste campo concentram-se em diferentes alternativas de regulação de tensão, baseadas nas seguintes estratégias de compensação de reativos: bancos de capacitores compostos série-shunt (Basset e Potter, 1935; Wang e Jina-Yi, 1997; Chan, 1995; Chan, 1994; Bim *et alii*, 1989), retificadores controlados (Watson *et alii*, 1979; Watanabe *et alii*, 1983; Rocha *et alii*, 1984; Watanabe e Barreto, 1987; Bonert e Rajakaruna, 1998), reatores chaveados por tiristores (Brennen e Abbondanti, 1977; Pinheiro *et alii*,

1988; Quispe *et alii*, 1997), chaveamento de bancos discretos de capacitores (Malik e Haque, 1986; Malik e Mazi, 1987; Chan, 1993), ou reatores saturados (Doxey, 1963; Alghuwainem, 1997). Estas estratégias empregam contactores, relés ou chaves semicondutoras na sua implementação.

Embora as metodologias mencionadas anteriormente tenham contribuído consideravelmente para a melhoria do problema da regulação de tensão do GI, a frequência síncrona permanece variável. Desta maneira, a característica de magnetização do gerador continua sendo afetada pela variação da carga, exigindo uma ampla faixa de valores da potência reativa necessária para manter a regulação de tensão. Além disto, a elevação excessiva da corrente de magnetização com o intuito de manter a tensão terminal, pode acarretar a saturação do gerador e a conseqüente distorção da forma de onda da tensão.

A deterioração da regulação de tensão do GI, ocasionada pela variação da frequência síncrona, desperta o interesse no desenvolvimento de uma estratégia de operação para o GI, capaz de manter a frequência síncrona constante, bem como de suprir a potência reativa solicitada pelo gerador e sua carga.

Duas estruturas capazes de prover tensão trifásica regulada com frequência constante são apresentadas neste trabalho. Estas estruturas utilizam a associação entre gerador de indução trifásico e inversor trifásico de tensão chaveado no modo PWM, a fim de fixar a frequência síncrona do GI e compensar a potência reativa do sistema.

3 DESCRIÇÃO DOS SISTEMAS PROPOSTOS

Uma das estruturas propostas não utiliza regulador de velocidade, e toda potência elétrica produzida pelo GI é adequadamente consumida, com o objetivo de manter regulada a tensão terminal do gerador; uma vez que a ausência de regulador de velocidade não permite o controle do valor da potência elétrica gerada (Marra e Pomilio, 1998 e 1998a). Neste caso o excedente da energia gerada, não consumida pela carga CA, é enviado à rede através de uma linha monofásica.

Esta configuração pode ser aplicada em propriedades rurais atendidas por linhas monofásicas, e com disponibilidade hídrica para geração de energia. Na ausência da rede, a energia excedente pode ainda ser consumida por cargas auxiliares ajustáveis no lado CC ou CA do inversor (Marra e Pomilio, 1998b e 1999).

A outra estrutura, cuja utilização é mais adequada para sistemas de geração cuja fonte primária de energia apresenta custo elevado (geração Diesel), emprega o regulador de velocidade da máquina primária, com a finalidade de controlar o valor da potência gerada (Marra e Pomilio, 1999).

O objetivo de ambas estruturas é gerar tensões trifásicas, senoidais e balanceadas, com frequência constante e amplitude regulada.

3.1 Sistema com Velocidade Controlada

Este sistema é composto fundamentalmente pelo gerador de indução trifásico em gaiola, excitado por um banco trifásico de capacitores (C_{ca}) e conectado ao lado CA de um inversor PWM alimentado em tensão, através de indutâncias série (L_f). A

velocidade do rotor é controlada pelo regulador de velocidade, conforme apresentado na figura 4 (Marra e Pomilio, 1999).

A potência nominal deste tipo de sistema é limitada pela influência dos inversores PWM de tensão disponíveis comercialmente, no custo total do sistema

O sistema é isolado da rede elétrica e sua partida é realizada através da auto-excitação do gerador, obtida pela interação entre a tensão produzida pelo fluxo residual e a capacitância C_{ca} .

Após a partida, o GI provê a energia necessária para carregar o capacitor C_{cc} e suprir as perdas do sistema. Um conversor CC-CC tipo *forward* alimenta o circuito de controle do inversor, a partir da energia armazenada em C_{cc} .

O inversor de tensão PWM mantém a frequência fundamental da tensão CA constante em 60Hz, produzindo, desta maneira, uma frequência síncrona de referência constante para o gerador.

A tensão terminal do GI apresenta forma de onda senoidal, devido à ação do filtro L_f - C_{ca} , que atenua as componentes de tensão de alta frequência do inversor.

A capacitância C_{ca} é dimensionada de modo a possibilitar a partida auto-excitada do GI com velocidade síncrona. Determinada C_{ca} , a indutância L_f é dimensionada de acordo com a frequência de corte pretendida para o filtro (normalmente uma década abaixo da frequência de chaveamento do inversor PWM), conforme a equação 2.

$$L_f = \frac{1}{(2\pi f_c)^2 C_{ca}} \quad (2)$$

Diversamente do que ocorre nos geradores síncronos, cuja velocidade deve ser mantida constante, o regulador deve adequar a velocidade do rotor, de modo que o escorregamento tenha o valor necessário para produzir a potência ativa solicitada pelo sistema (figura 4). Assim sendo o valor da velocidade de referência (ω_{ref}) varia com a potência ativa da carga.

Caso o GI produza mais potência que aquela consumida pela carga CA, o excedente de potência é armazenado no capacitor C_{cc} , no lado CC do inversor, acarretando a elevação da tensão V_{cc} . Por outro lado, se houver déficit na energia produzida pelo gerador, parte da energia armazenada em C_{cc} é empregada para suprir a carga, ocasionando a redução de V_{cc} .

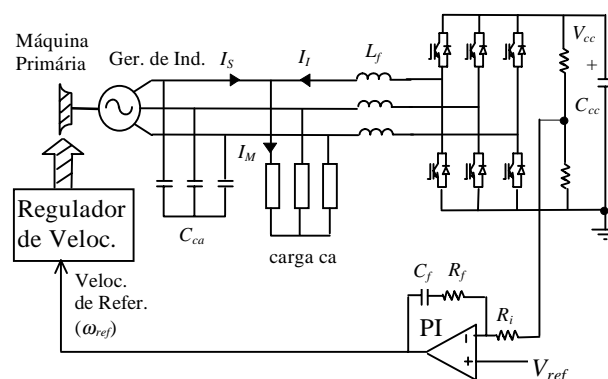


Figura 4 - Configuração do Sistema com velocidade regulada.

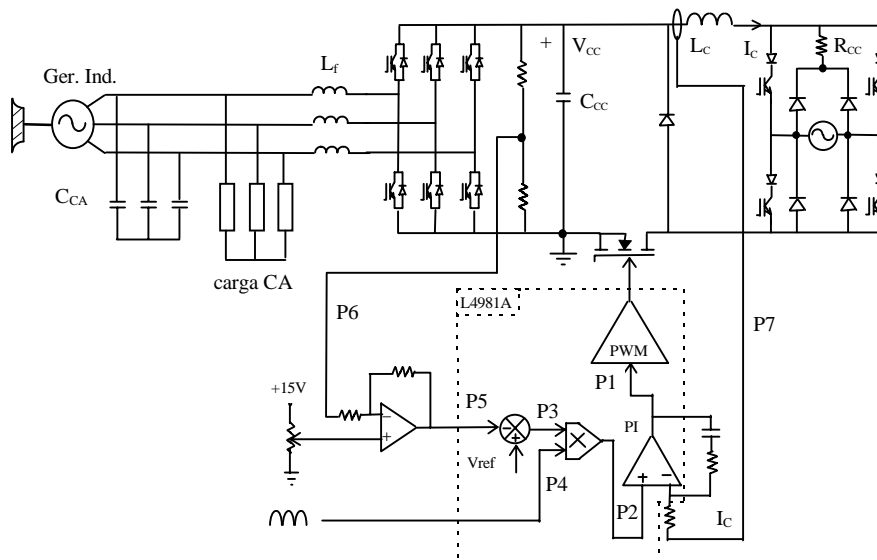


Figura 5 - Configuração do sistema com velocidade não-regulada

Desta maneira, V_{cc} é o parâmetro adequado para determinar o balanço de potência do sistema, sendo portanto, a variável controlada pelo regulador de velocidade. Assim, este regulador opera com o objetivo de manter o valor de V_{cc} igual à tensão de referência V_{ref} , o que indiretamente significa manter o balanço de potência do sistema.

A manutenção de V_{cc} em um valor constante indica que a potência gerada pelo GI é igual à potência consumida pelo restante do sistema. Além disto, o controle de V_{cc} garante uma satisfatória regulação da tensão terminal do GI, uma vez que o capacitor C_{cc} é a fonte de tensão do inversor e a queda de tensão em L_f é a única diferença entre V_{cc} e a tensão terminal do gerador.

A indutância L_f é dimensionada de modo a filtrar as componentes de tensão na frequência de chaveamento do inversor ou maiores, resultando em baixos valores de queda de tensão na frequência de 60Hz.

É possível ainda obter-se tensão terminal praticamente constante em regime permanente, compensando-se a queda em L_f , através do controle do índice de modulação do inversor, a partir da realimentação da tensão terminal do gerador.

Considerando-se que o inversor PWM permite o fluxo bidirecional de potência entre os lados CA e CC, a capacidade de compensar a potência reativa da carga CA é uma consequência natural da configuração do sistema e da sua forma de operação. Portanto, a tensão terminal do gerador é mantida regulada, mesmo que a carga CA seja predominantemente reativa, desde que V_{cc} seja mantida constante e o limite de potência nominal do inversor seja respeitado.

A energia armazenada em C_{cc} é também de suma importância para aumentar a robustez do sistema diante da ocorrência de transitórios, tais como partida direta de motores de indução, transitórios de carga e correntes de *inrush*. Assim, o comportamento transitório da carga deve ser considerado no dimensionamento de C_{cc} .

A figura 4 apresenta a utilização de um controle no qual utiliza-se um ganho proporcional-integral (PI) para o

amplificador de erro da malha de realimentação da tensão CC. No entanto, outro tipo de compensador pode ser empregado como alternativa para melhorar o desempenho dinâmico do sistema.

3.2 Sistema sem Controle de Velocidade

Este sistema é adequado para ser empregado em micro centrais hidroelétricas com potências de até 50 kW, em propriedades rurais que disponham de fonte hidráulica de energia e sejam alimentadas por linha monofásica.

A potência nominal deste sistema é limitada pela disponibilidade no mercado de turbinas hidráulicas adequadas para operar com velocidade não controlada (Viana, 1997). Além disto, a potência nominal da linha monofásica deve permitir que toda a potência gerada possa ser absorvida pela rede, caso seja necessário.

A estratégia de operação deste sistema é a mesma do sistema com velocidade controlada, ou seja, o inversor de tensão PWM é utilizado com o objetivo de fixar a frequência fundamental nos terminais do estator do GI, e a manutenção da tensão V_{cc} constante assegura boa regulação de tensão para o gerador. Assim como no sistema anterior, a presença do inversor PWM permite a compensação da potência reativa da carga CA, e aumenta a estabilidade do sistema na presença de transitórios. Conforme apresentado na figura 5, este sistema não possui regulador de velocidade. Desta maneira, a potência gerada é determinada pela máquina primária (Marra e Pomilio, 1998).

A partida do sistema também neste caso pode ser realizada através da auto-excitação do gerador, obtida pela interação entre a tensão produzida pelo fluxo residual e a capacitância C_{ca} .

Outra alternativa de partida para este sistema é o carregamento do capacitor C_{cc} , com energia fornecida pela rede monofásica, através do retificador em série com o resistor R_{cc} . Após a efetiva partida do sistema, este retificador deixa de atuar uma vez que V_{cc} é ajustado em um valor superior à tensão de pico da rede, polarizando os diodos reversamente.

Uma vez que a potência gerada não é controlada, a regulação da tensão V_{cc} é alcançada enviando-se o excedente da energia

gerada para a rede da concessionária, através da linha monofásica.

Considera-se neste caso que a máquina primária é uma turbina hidráulica com velocidade não regulada. Assim, é necessário coordenar as curvas de conjugado da turbina e do GI, de forma que a velocidade correspondente ao ponto de máxima potência, não corresponda a um valor de escorregamento acima do escorregamento nominal do gerador. O lado CC do sistema é conectado de forma assíncrona à linha monofásica através de um inversor de corrente (figura 5). O sistema opera então como co-gerador, enviando o excedente da energia produzida para a rede.

Um conversor CC-CC do tipo abaixador de tensão é usado para modular a corrente I_c , de modo a tornar sua forma senoidal, de maneira semelhante ao que é feito nas fontes de alimentação CA-CC com alto fator de potência (Ayres e Barbi, 1997).

4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Ambos os sistemas descritos foram implementados utilizando uma MIG de fabricação WEG, com 4 pólos, potência nominal de 1/2 cv e tensão nominal de 220V em conexão delta. Utilizou-se também $C_{ca} = 37\mu\text{F}$, $L_f = 5\text{mH}$ e frequência de chaveamento de 5kHz para o inversor de tensão PWM. Os valores de C_{cc} utilizados em cada uma das estruturas, foram determinados de modo a obter-se comportamento dinâmico satisfatório durante a operação tanto em regime permanente quanto na presença de transitórios na carga.

4.1 Sistema com Velocidade Controlada

A implementação do sistema com velocidade regulada (figura 4) foi realizada empregando-se um motor CC com excitação independente, acionado por um retificador controlado, como máquina primária para o gerador. Utilizou-se neste caso capacitância $C_{cc} = 6000\mu\text{F}$.

A figura 6 apresenta as tensões terminais de linha em regime permanente, no inversor PWM e no GI. Observa-se que o filtro L_f-C_{ca} atua de modo efetivo na eliminação das componentes de tensão de alta frequência nos terminais do gerador.

A curva de velocidade do rotor do GI em função da potência ativa da carga CA, obtida experimentalmente, é apresentada na figura 7. Nota-se que o regulador de velocidade promove a aceleração do rotor, à medida em que aumenta a potência

requerida pela carga. Desta forma, a frequência de escorregamento do gerador é incrementada de modo proporcional à carga alimentada.

A partida de um motor de indução tipo gaiola, com 8 pólos e potência de 1/3 cv (70% da potência nominal do GI), foi realizada através da conexão direta do motor aos terminais do gerador. A figura 8 apresenta o registro da corrente do motor e da tensão terminal do gerador, durante a partida.

Durante a partida, parte da energia armazenada em C_{cc} foi empregada na aceleração do motor. Daí, observa-se uma queda transitória da tensão nos terminais do gerador, a qual é eliminada posteriormente pela ação do regulador de velocidade sobre V_{cc} .

A máxima queda de tensão terminal desejável para o GI durante a partida direta de motores, é um parâmetro a ser considerado no dimensionamento do capacitor C_{cc} .

A atuação do inversor PWM como compensador de potência reativa para a carga CA é destacada na figura 9, a qual apresenta o instante da desconexão do motor de indução operando a vazio.

A figura 9 apresenta as correntes de linha no inversor (I_I), no motor de indução (I_M) e a corrente resultante do conjunto GI mais banco de capacitores (I_S), cujos sentidos adotados como positivos estão indicados na figura 4.

Após a desconexão do motor, extingue-se a parcela de corrente relativa à magnetização em I_I e a parcela relativa às perdas do motor em I_S , permanecendo as componentes de corrente de alta frequência que fluem no filtro L_f-C_{ca} .

A tensão terminal variou de 226V a 224V para a variação da carga de zero até a potência nominal, indicando uma regulação de tensão bastante satisfatória, tanto para cargas com potência ativa como reativa.

4.2 Sistema sem Controle de Velocidade

A implementação deste sistema foi realizada conforme a configuração da figura 5, utilizando-se $C_{cc} = 2400\mu\text{F}$, $L_c = 4\text{mH}$ e frequência de chaveamento de 25kHz para o conversor abaixador de tensão.

O circuito integrado L4981A, normalmente empregado em circuitos pré-reguladores de fator-de-potência em conversores

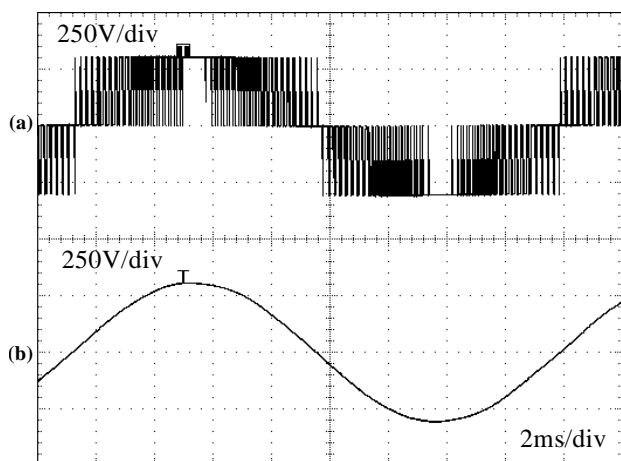


Figura 6 - Tensões terminais no inversor PWM (a) e no gerador de indução (b).

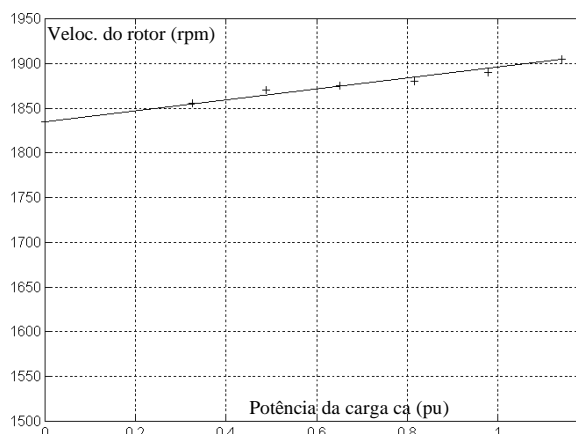


Figura 7 - Relação entre a velocidade do rotor (rpm) e a potência ativa da carga CA (pu).

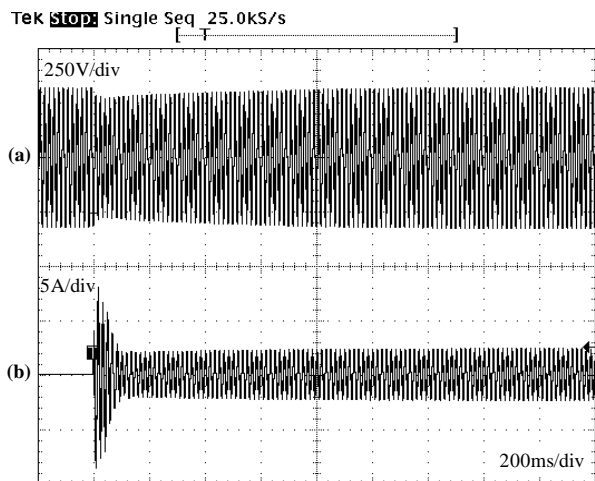


Figura 8 - Tensão terminal do GI (a) e corrente de linha do motor (b), durante a partida direta.

CA-CC, foi utilizado para controlar o chaveamento do conversor abaixador, a fim de produzir corrente com forma de onda senoidal e em fase com a tensão da rede monofásica.

Os resultados obtidos com este sistema, com relação à forma de onda da tensão terminal do GI, à capacidade de compensar a potência reativa da carga e de sustentar a partida direta de motores de indução, são similares aos anteriormente descritos para o sistema com velocidade regulada.

A tensão da rede e a corrente injetada através do inversor de corrente são apresentadas na figura 10.

Nota-se que a corrente está em fase com a tensão e apresenta forma de onda praticamente senoidal. O espectro de frequências da corrente do inversor confirma o seu baixo conteúdo harmônico.

A figura 11 apresenta uma seqüência de transitórios, que consiste em reduções sucessivas da potência da carga resistiva alimentada pelo GI, partindo-se de um carregamento de 120% da potência nominal até a operação sem carga. A cada redução de potência na carga, a corrente enviada para a rede monofásica sofre uma elevação. Percebe-se que a tensão terminal do gerador não é afetada de forma relevante durante os transitórios de carga.

O sistema apresentou valores satisfatórios de regulação de tensão de 1,8% para cargas resistivas e 2,2% para cargas indutivas. Ambos os tipos de cargas foram desequilibradas durante os testes e nenhuma influência do desequilíbrio foi percebida na tensão terminal.

5 CONCLUSÕES

Uma estratégia de operação para um sistema de geração de energia baseado em gerador de indução, operando com frequência síncrona constante, tensão regulada, capaz de alimentar cargas indutivas e sustentar a partida de motores, foi apresentada neste trabalho. A estratégia proposta é compatível com operação tanto com velocidade regulada, quanto com velocidade não regulada na máquina primária.

Duas estruturas foram propostas, sendo que uma delas emprega regulador de velocidade na máquina primária, com o objetivo de adequar a potência gerada à demanda da carga. A outra estrutura proposta não utiliza o regulador de velocidade, e a potência gerada é determinada pela disponibilidade de

potência na máquina primária. Neste caso, o sistema opera como co-gerador, enviando o excedente de energia para uma rede monofásica.

Os sistemas propostos são adequados para utilização em sistemas cuja fonte energética produz variações de velocidade da máquina primária em uma faixa relativamente estreita, tais como MCH e geradores Diesel.

Em ambos os sistemas, o inversor PWM garante frequência constante nos terminais do GI e provê a compensação da potência reativa na carga CA. Além disto, a energia armazenada no capacitor C_{cc} é uma forma de armazenar energia com rápida disponibilidade de uso, resultando no aumento da robustez do sistema diante de transitórios de carga, tais como partida de motores e elevados incrementos de potência na carga.

O sistema apresentou, experimentalmente, boa robustez e capacidade de operar com tensão regulada e frequência constante, inclusive na presença de cargas indutivas.

A associação de GI com inversores de tensão PWM, nos níveis de potência propostos para as estruturas descritas neste trabalho, é hoje possível graças à evolução experimentada pelos conversores e semicondutores eletrônicos de potência nas duas últimas décadas.

O emprego de uma máquina de indução com rotor em gaiola de

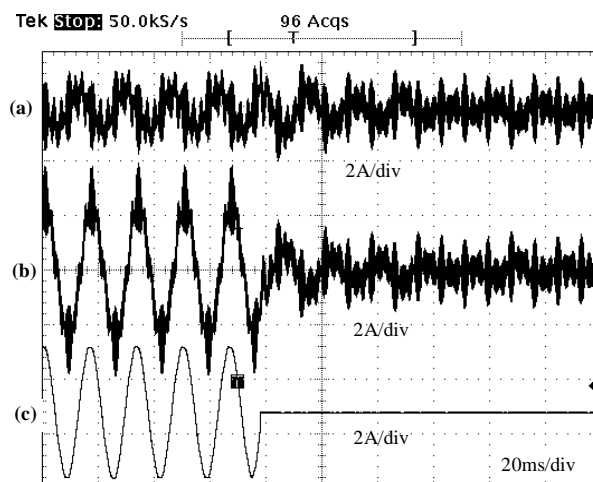


Figura 9 - Corrente no conjunto GI-banco C_{ca} (I_S) (a), no inversor PWM (I_I) (b) e no motor (I_M) (c).

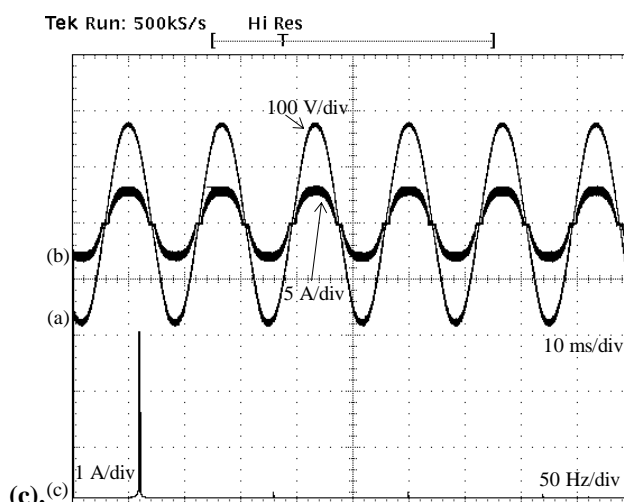


Figura 10 - Tensão na rede monofásica (a), corrente injetada na rede (b) e espectro da corrente injetada (c).

projeto convencional, associada a um inversor de tensão PWM de propósito geral, torna os sistemas propostos uma alternativa atrativa, em termos de custos, em relação ao emprego do gerador síncrono, para potências de até 50 kW.

O controle da tensão V_{cc} do inversor, exercido pelo regulador de velocidade, comprovou ser uma estratégia eficaz para obtenção do balanço de potência do sistema e regulação da tensão terminal do gerador, no sistema de geração com velocidade controlada.

A operação do sistema como co-gerador de energia, enviando corrente senoidal e com fator de potência unitário para a rede, através de uma linha monofásica, apresentou-se como uma metodologia eficaz de controle da tensão V_{cc} . Esta metodologia permite a eliminação do regulador de velocidade, resultando em significativa redução de custos em casos como o de MCH de baixa potência.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro das agências FAPESP e CAPES, bem como o auxílio do Prof. Giorgio Spiazzi na realização experimental.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ayres, C. A., I. Barbi (1997). A family of converters for UPS production burn-in energy recovery. *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 12, No. 4, pp. 615-622.

Alghuwainem, S. M. (1997). Steady-state analysis of a self-excited induction generator self-regulated by a shunt saturable reactor. *IEEE International Electrical Machines and Drives Conference Record (IEMDC'97)*, pp. MB1-10.1-MB1-10.3, Milwaukee, USA.

Bassett, D. E. and M. F. Potter (1935). Capacitive excitation for induction generators. *AIEE Transactions*, Vol. 54, pp. 540-543.

Bim, E., J. Szajner, Y. Burian. (1989). Voltage compensation of an induction Generator with long-shunt connection. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 4, No. 3, pp. 526-530.

Bonert, R. and S. Rajakaruna. (1998). Self-Excited Induction Generator with Excellent Voltage and Frequency Control. *IEE Proceedings*, Part C, Vol. 145, No. 1, pp. 33-39.

Brennen, M. B. and A. Abbondanti. (1977). Static Exciters for Induction Generators. *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 13, No. 5, pp. 422-428.

Chan, T. F. (1993). Capacitance requirements of self-excited induction generators. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 8, No. 2, pp. 304-311.

Chan, T. F. Chan. (1994). Steady-state analysis of self-excited induction generators. *IEEE Trans. on Energy Conversion*, Vol. 9, No. 2, pp. 288-296.

Chan, T. F. (1995). Analysis of self-excited induction generators using an iterative method. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 10, No. 3, pp. 502-507.

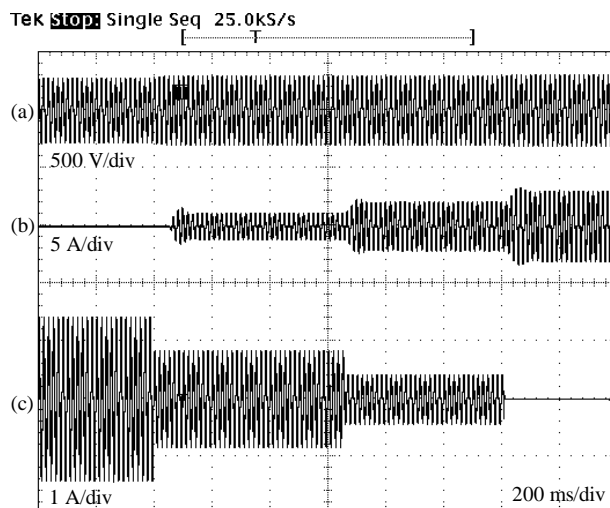


Figura 11 - Tensão terminal do GI (a), corrente injetada na rede (b) e corrente de linha na carga (c).

Doxey, B. C. (1963). Theory and applications of capacitors excited induction generators. *The Engineer*, Vol. 216, pp. 893-897.

Malik, N. H. and S. E. Haque. (1986). Steady state analysis and performance of an isolated self-excited induction generator. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. EC-1, No. 3, pp. 134-140.

Malik, N. H. and A. A. Mazi. (1987). Capacitive requirements for isolated self-excited induction generators. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. EC-2, No. 1, pp. 62-69.

Marra, E. G. and J. A. Pomilio (1998). Self-Excited Induction Generator Controlled by a VS-PWM Converter Providing High Power-Factor Current to a Single-phase Grid. *Proceedings of IEEE IECON'98*, Aachen, Germany, pp. 703-708.

Marra, E. G. e J. A. Pomilio. (1998a). "Aplicação de um gerador de indução trifásico auto-excitado fornecendo corrente com alto fator de potência para a rede monofásica". *Anais do XII Congresso Brasileiro de Automática*, Uberlândia, MG.

Marra, E. G. e J. A. Pomilio (1998b): Gerador de Indução Excitado por Conversor de Tensão PWM Bidirecional para Aplicações Rurais. *Revista Eletrônica de Potência*, vol. 3, nº 1, pp. 28-34.

Marra, E. G. and J. A. Pomilio (1999): Self-excited Induction Generator Controlled by a VS-PWM Bi-directional Converter for Rural Applications. *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 35, no. 4, pp. 877-883.

Marra, E. G. and J. A. Pomilio (1999a). Induction Generator Based System Providing Regulated voltage with Constant Frequency. *Proceedings of IEEE APEC'99*, Dallas, USA, pp. 410-415.

Pinheiro, R. F., S. Carneiro Jr., E. H. Watanabe, J. I. Rêgo. (1988). Controle de Gerador de Indução por Reator Controlado por Tiristores. *Anais do 7º Congresso Brasileiro de Automação*, São José dos Campos-SP, pp. 505-510.

- Quispe, E. C., R. D. Arias, J. E. Quintero. (1997). A New Voltage Regulator for Self-Excited Induction Generator - Design, Simulation and Experimental Results. *IEEE International Electrical Machines and Drives Conference Record (IEMDC'97)*, pp. TB1-7.1-TB1-7.3, Milwaukee, USA.
- Rocha, C. L., E. H. Watanabe, S. Carneiro. (1984). Estudo de um Sistema Gerador de Indução Auto-excitado Acoplado a um Retificador/Chopper. *Anais do V Congresso Brasileiro de Automática (V CBA)*, pp. 293-297, Campina Grande, Brasil.
- Viana, A. N. C. (1997). Pequenas Centrais Hidrelétricas no Meio Rural. Minicurso, *II Encontro Nacional de Energia Elétrica e Meio Ambiente (II ENELMA)*. Poços de Caldas, Brasil.
- Wagner, C. F. (1939). Self-excitation of induction motors. *AIEE Transactions*, Vol. 58, pp. 47-51.
- Wang, L. and S. Jina-Yi. (1997). Effects of long-shunt and short-shunt connections on voltage variations of a self-excited induction generator. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 12, No. 4, pp. 368-374.
- Watanabe, E. H., S. Carneiro Jr., J. Nascimento, L. C. Rocha. (1983). Sistema Gerador de Indução / Retificador com Controle do Fator de Potência para Aproveitamento Eólico. *Anais do I CT-COPPE*, Rio de Janeiro, Brasil.
- Watanabe, E. H. e A. N. Barreto. (1987). Self-excited Induction Generator/Force-commutated Rectifier System Operating as a DC Power Supply. *IEE Proceedings*, Vol. 134, Pt. B, No. 5, pp. 255-260.
- Watson, D. B., J. Arrilaga, B. E. Densem. (1979). Controllable DC Power Supply from Wind-driven Self-excited Induction Machines. *IEE Proceedings*, Vol. 126, No. 12, pp. 1245- 1248.