

SISTEMA DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA UTILIZANDO GERADOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO E FONTES CC CONECTADO A REDE MONOFÁSICA

Ricardo Quadros Machado, Simone Buso* e José Antenor Pomilio
Universidade Estadual de Campinas – Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação
CEP 13081-970, C.P. 6101, Campinas-SP Brasil
e-mail: {ricardom, antenor}@dsce.fee.unicamp.br

*Universidade de Padova – Departamento de Engenharia da Informação
Via Gradenigo, 6/B 35135, Padova Itália
e-mail: simone.buso@dei.unipd.it

Resumo – Este artigo apresenta uma nova forma de conectar diretamente um gerador de indução trifásico a uma rede monofásica. O funcionamento do sistema prevê que seja garantida ao usuário local energia elétrica de boa qualidade (tensões senoidais e equilibradas, frequência fixa e boa regulação de tensão). Para a rede monofásica, controla-se o fluxo de potência de modo que o fator de potência resultante seja unitário. A obtenção destes comportamentos se dá com o uso de um conversor CC-CA PWM trifásico, conectado em derivação no ponto de acoplamento das cargas locais. Por este conversor flui uma parcela da potência da carga relacionada com desequilíbrios e distorções de corrente. A maior parte da potência ativa não precisa ser processada pelo conversor quando não há fonte CC conectada ao barramento CC, o que dá a esta solução um rendimento maior do que se obtém com as alternativas de dupla conversão (retificador e inversor). Há também a possibilidade de fontes CC (células a combustível, painéis fotovoltaicos ou bancos de baterias) serem conectadas ao barramento CC. Com isso, é ampliada a capacidade geradora. O controle dos conversores é feito através de um DSP de ponto fixo e de um circuito integrado dedicado.

Palavras-Chave – Fontes alternativas de energia, gerador indução, sistemas de geração distribuída, DSP, inversor.

DISTRIBUTED GENERATION SYSTEM WITH THREE-PHASE INDUCTION GENERATOR AND DC SOURCE CONNECTED TO A SINGLE-PHASE FEEDER

Abstract – This paper proposes a novel solution to connect a three-phase induction generator directly to a single-phase feeder. Typical situation are found in rural areas in which is possible to obtain local power generation. High power quality to the customers such as sinusoidal and balanced voltages, constant frequency and regulated AC voltage is necessary. Additionally, unity power factor on the feeder is intended. A three-phase shunt voltage source inverter VSI-PWM is connected at the point of common coupling. This converter processes

a fraction of the load power that is associated with unbalanced and harmonics currents, and reactive power, as well. The efficiency of the partial power processing is higher when compared to double-conversion systems (rectifier + inverter). On the other hand, the system must be able to manage a DC source as fuel cells, a solar panel and batteries. This operation mode is known like double-conversion system. The three-phase PWM converter is controlled with a fixed point DSP and the DC-DC converter with a dedicate microchip.

Keywords – Digital control, induction generator, renewable energy sources.

NOMENCLATURA

CA	Corrente Alternada
CEP	Conversor Eletrônico de Potência
CC	Corrente Contínua
DSP	Processador Digital de Sinais
GI	Gerador de Indução
i_{AS}, i_{BS}, i_{CS}	Corrente instantânea na fase, excluindo a parcela consumida pela carga
I_{fonte}	Notação fasorial da corrente na rede monofásica
MP	Máquina primária
P_{fonte}	Potência ativa na rede monofásica
P_G	Potência gerada pelo GI
P_L	Potência consumida pelas cargas
PWM	Modulação por Largura de Pulso
v_{AB}, v_{BC}, v_{CA}	Tensão instantânea de linha
VSI	Inversor fonte de tensão
V_{fonte}	Notação fasorial da tensão rede monofásica
V_{AB}	Notação fasorial da tensão de imposta pelo CEP
V_{L_s}	Notação fasorial da tensão sobre L_s
v_A, v_B, v_C	Tensão instantânea de fase
FC	Fuel cell (célula a combustível)
DHT	Distorção Harmônica Total

I. INTRODUÇÃO

A proposta aqui apresentada contempla um sistema híbrido de geração de energia acionado por fonte hidráulica (sem regulação mecânica de velocidade) associada a outras fontes alternativas de geração de energia. A máquina empregada como gerador é a máquina de indução trifásica com rotor em gaiola [1].

As vantagens da máquina de indução operando como gerador, já identificadas há décadas [2, 3] são: robustez e simplicidade construtiva; capacidade de auto-proteção, baixos níveis de correntes de curto-circuito; reduzida

necessidade de manutenção; maior densidade de potência em relação a outros tipos de máquinas; aplicação extremamente difundida, propiciando grande disponibilidade de mercado e baixo custo relativo; capacidade de operar como gerador, mesmo quando acionada em velocidade variável.

A necessidade de compensação externa de reativos para a excitação do gerador, as deficiências na regulação da tensão e da frequência, e ainda a dependência da tensão e da frequência com relação à carga ativa do gerador são desvantagens do gerador de indução que podem ser superadas através de seu uso quando associado a um conversor eletrônico de potência [4, 5].

Outras fontes de energia renováveis de interesse são, principalmente, os painéis fotovoltaicos e as células a combustível. Nos painéis solares tem-se a transformação da energia solar em eletricidade, o que é feito por módulos fotovoltaicos. Células solares são dispositivos semicondutores que convertem a energia luminosa incidente em corrente contínua, com rendimento entre 3% e 25%. A eficiência, por sua vez, é dependente da intensidade do espectro de iluminação, da temperatura, do projeto e do material da célula. Esta possui comportamento semelhante a uma bateria de baixa tensão (em torno de 0,5 V), cuja carga é continuamente re-completada numa taxa proporcional à iluminação incidente. A conexão série-paralelo permite o projeto de centrais com correntes e tensões mais elevadas. A utilização do armazenamento de energia e os equipamentos de condicionamento da energia podem constituir um sistema bastante eficaz no fornecimento de energia elétrica. Esta tecnologia é mais apropriada para aplicações em pequena escala [6].

Células a combustível são dispositivos eletroquímicos semelhantes às baterias convencionais, com a diferença fundamental de que, nas primeiras, o combustível e o oxidante são fornecidos continuamente para que seja possível gerar energia elétrica. As células a combustível têm como princípio básico a reação eletroquímica do hidrogênio ou de outros gases combustíveis e que podem chegar a potências de centenas kW. Uma expectativa de 70% de eficiência, como os meios científicos prevêem, representará um grande contraste em relação às centrais de geração de energia através da combustão, cuja eficiência situa-se entre 35% e 40%. O custo elevado do kWh é o maior empecilho para sua utilização em escala comercial [6].

Estudos anteriores trataram da conexão assíncrona entre o GI e a rede [7,8], e da operação isolada do IG, mas com regulação de frequência e tensão por meio de um CEP [9].

II. ELETRIFICAÇÃO RURAL

Atualmente a geração distribuída de energia elétrica é responsável por 3% da matriz energética brasileira, mas a expectativa é que esse índice atinja entre 10% e 15% ao final da próxima década. Isso representa um acréscimo de 8 GW a 12 GW à capacidade instalada do setor elétrico brasileiro, com a vantagem de estar sendo gerada com baixo impacto ambiental [10].

O interesse na investigação de estruturas que possibilitem tal geração distribuída a partir de fontes renováveis tem crescido por motivos econômicos e ambientais. Sua viabilidade, muitas vezes, depende de interfaces de

eletrônicas de potência, as quais processam a energia gerada antes de seu consumo ou sua injeção na rede elétrica.

Até pouco tempo, a eletrificação rural preocupava-se essencialmente em levar energia aos usuários para fins de iluminação e para alimentação de motores monofásicos de pequena potência. O perfil do usuário, no entanto, tem se modificado, bem como as cargas alimentadas. A disponibilidade de uma alimentação trifásica e com boa qualidade de energia é uma necessidade real, devido ao aumento no uso de equipamentos eletro-eletrônicos que exigem uma boa qualidade, principalmente da tensão suprida, para sua correta operação.

Em situações nas quais os consumidores possuem apenas uma rede monofásica, para melhorar a qualidade de energia e aumentar a capacidade de fornecimento, a solução seria alterar sistema rural passando o mesmo de monofásico para trifásico [11]. Para atender estes consumidores alguns autores [12, 13] propuseram a conexão direta entre gerador de indução e rede monofásica. No entanto, estas alternativas baseiam-se na conexão de “Steinmetz” [14] e a operação do sistema torna-se restrita a condições muito específicas. Caso ocorra mudança na carga, tais conexões devem ser refeitas para que o sistema continue trabalhando com tensões equilibradas.

O aspecto diferencial do trabalho aqui proposto é a conexão direta de um gerador de indução trifásico a uma linha monofásica, sem que haja desequilíbrios na operação do gerador. Além disso, é prevista a conexão de uma fonte adicional com característica CC.

Em situação típica de vastas regiões rurais do país onde coexistem recursos hídricos e outras fontes energéticas que permitem geração local de energia e ainda o envio do excedente para o sistema a possibilidade de se empregar gerador de indução associado a conversores de potência é o estado da arte nas pesquisas cujo principal objetivo é fornecer energia de boa qualidade ao usuário.

O sistema eletrônico deve atuar de modo a fornecer ao usuário energia elétrica dentro dos padrões de qualidades e enviar para a rede monofásica o excesso da energia produzida.

O sistema alternativo de geração de energia (célula solar ou célula a combustível) será conectado no barramento CC do conversor eletrônico de potência de tal forma que a energia produzida por ele seja também enviada à rede monofásica ou consumida localmente.

Dada a situação de aplicação prevista (meio rural com disponibilidade hídrica), a questão da otimização da geração da energia não é fundamental. Pode-se mesmo conceber o uso em cargas auxiliares para o consumo do excedente de energia gerada localmente, caso a rede monofásica não esteja disponível para receber o excedente gerado. A eliminação do controle, principalmente da fonte hídrica, tem um impacto muito significativo no custo global do sistema.

III. O SISTEMA PROPOSTO

Parte-se de um sistema constituído de um GI conectado diretamente a uma rede monofásica, Figura 1 [15, 16]. Os parâmetros do GI utilizados nestes estudos são mostrados na Tabela I e foram obtidos em ligação delta e em 60 Hz.

Neste tipo de conexão, a rede monofásica define a frequência de operação do GI e a tensão de trabalho nas fases conectadas. O sistema estudado não utiliza controle de velocidade, isto é, não existe mecanismo que atue sobre a MP de forma a regular a potência de entrada. Se a carga solicitar uma demanda energética maior que o GI pode fornecer, o seu déficit será absorvido da rede monofásica. Caso contrário, é a rede quem absorverá o excedente. Um indutor é inserido localmente para conectar GI à rede monofásica.

TABELA I

Parâmetros da Máquina de Indução Utilizada [13]

Resistência do estator (r_s)	2,50 Ω
Resistência do rotor (r_r)	1,803 Ω
Reatância de dispersão do estator (X_s)	2,411 Ω
Reatância de dispersão do rotor (X_r)	2,022 Ω
Reatância de magnetização (X_m) ($2 \cdot \pi \cdot 60 \cdot L_m$)	100,12 Ω
Resistência de perdas no ferro e mecânicas (R_m)	1768 Ω

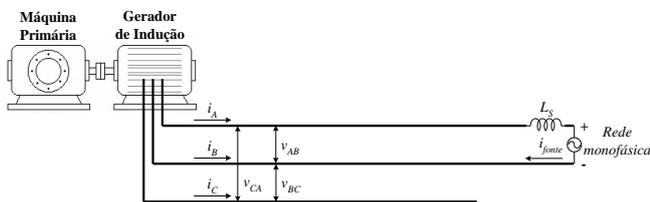


Fig. 1. Circuito de potência do sistema sem compensação.

O fato de conectar diretamente um GI em uma rede monofásica faz com que apenas uma das tensões de linha seja imposta ao GI, neste caso v_{AB} . O GI definirá as outras duas tensões v_{BC} e v_{CA} , as quais se tornam dependentes das quedas internas da máquina e de suas não-linearidades. Assim, tais tensões (v_{BC} e v_{CA}) podem possuir tanto amplitudes diferentes quanto distorções harmônicas, como mostra a Figura 2.

A Figura 3 apresenta a proposta que será discutida neste artigo. Para minimizar os problemas anteriormente apresentados, um CEP trifásico é inserido em derivação entre o GI e a rede monofásica de forma a impor tensões equilibradas ao GI e injetar ou absorver corrente da rede monofásica com FP unitário.

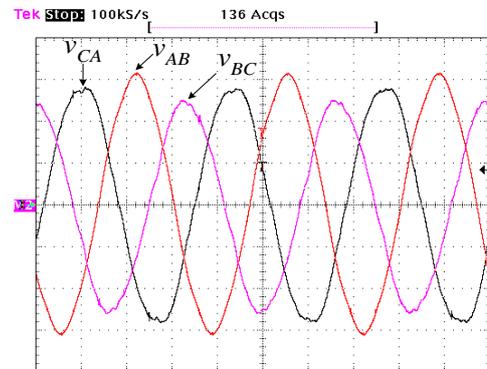
A presença de C_{conv} permite também a auto-excitação do GI mesmo na ausência da rede monofásica. A situação em que o sistema local de geração de energia deve operar isolado da rede elétrica é chamada de ilhamento [17]. No momento que ocorrer o ilhamento, as proteções localizadas no lado de alta tensão do alimentador devem abrir. Após esta ocorrência, para evitar que a geração local tenha que alimentar todos os consumidores locais, cabe ao sistema de geração distribuída se isolar dos demais consumidores de forma a preservar a sua operacionalidade.

O emprego de fontes adicionais de energia no barramento CC do CEP aumenta a capacidade geradora local. Tais fontes podem ser realizadas por células a combustível, painéis fotovoltaicos ou bancos de baterias.

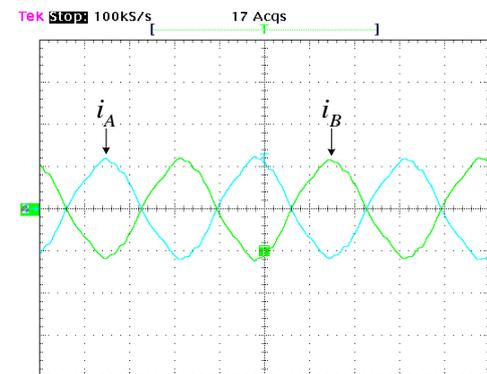
A. Método para Gerar as Referências para o CEP

O CEP é um inversor trifásico do tipo fonte de tensão cuja tarefa é impor tensões simétricas, equilibradas e senoidais no barramento CA ao qual são conectados o GI, as cargas e também a rede monofásica. Além disso, deve-se fazer um

ajuste da fase da tensão produzida pelo CEP em relação à tensão do alimentador, de maneira a resultar que I_{fonte} e V_{fonte} estejam em fase ou defasadas 180° , conforme a demanda da carga local, garantindo assim, fator de potência unitário na rede monofásica.



a) Tensão nos terminais do GI (100V/div). Horizontal: 5ms/div.



b) Correntes nos terminais do GI (10A/div). Horizontal: 5ms/div.

Fig. 2. Formas de onda de corrente e tensão do GI trifásico diretamente conectado em uma rede monofásica.

O fluxo de potência ativa pode ser controlado pela diferença da tensão entre dois pontos, o que é conseguido tanto pela alteração da amplitude quanto da defasagem, e depende da impedância entre os pontos de conexão.

Ressalta-se também que a imposição de tensão, além de equilibrar a operação do gerador, automaticamente realiza a compensação de reativos e de harmônicas já que o GI, devido a suas características, não compensa tais reativos. A rede monofásica, devido à imposição de FP=1, também está impossibilitada de fornecê-los.

Dado que o CEP impõe tensões senoidais e equilibradas no barramento, as correntes do gerador também serão senoidais e equilibradas. Ou seja, mesmo na presença de cargas desequilibradas, reativas e não-lineares, o GI mantém boas condições de operação. No caso geral, as correntes no CEP serão desequilibradas.

Outro fato importante é que se a demanda da carga for menor do que a geração local, o excesso de potência gerada é enviado à rede, caso não seja previsto algum tipo de armazenador de energia no local. No entanto, se a demanda de potência da carga for superior àquela disponibilizada pela geração local, o excedente deverá ser fornecido pela rede monofásica. Deste modo, a potência máxima da carga é a soma das potências fornecidas pela rede e pela geração local.

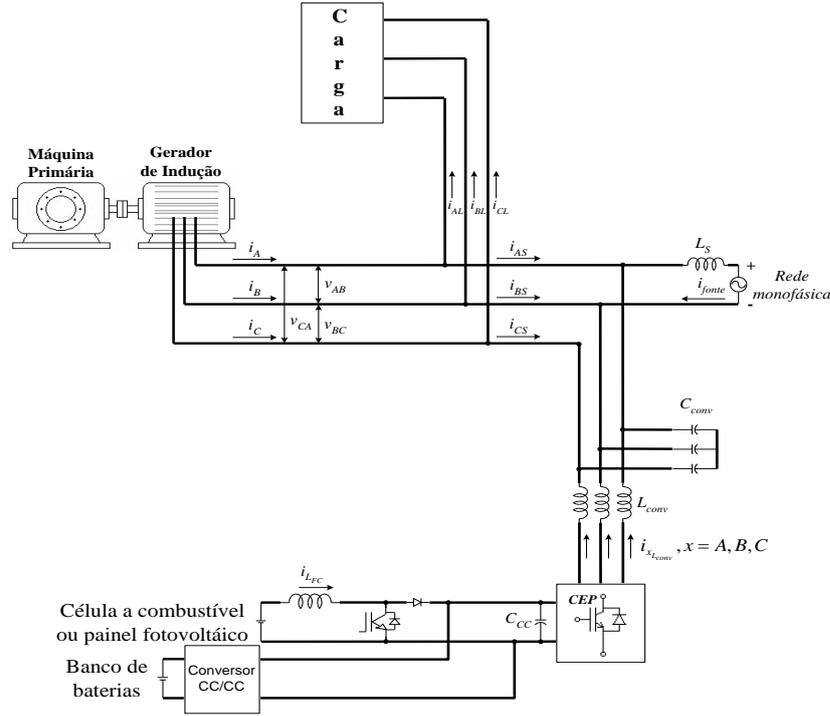


Fig. 3. Sistema completo com fontes CA e CC.

Em relação à rede monofásica, caso $P_{fonte} > 0$, o ângulo β , que é o ângulo de defasagem entre \mathbf{V}_{fonte} e \mathbf{V}_{AB} é positivo. Se $P_{fonte} < 0$, β será negativo, como mostra a Figura 4.

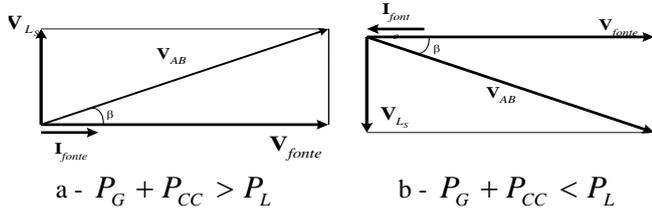


Fig. 4. Diagramas fasoriais para diferentes situações de demanda de potência.

B. Determinação do ângulo β

As tensões impostas pelo CEP, devem produzir uma tensão de linha \mathbf{V}_{AB} que, somada fasorialmente a \mathbf{V}_{fonte} , deve resultar em uma tensão \mathbf{V}_{LS} de modo que \mathbf{I}_{fonte} fique em fase com \mathbf{V}_{fonte} . Conforme indica a Figura 5, tal corrente será dependente de \mathbf{V}_{LS} e de \mathbf{X}_{LS} , que é a reatância do indutor de acoplamento na frequência da rede.

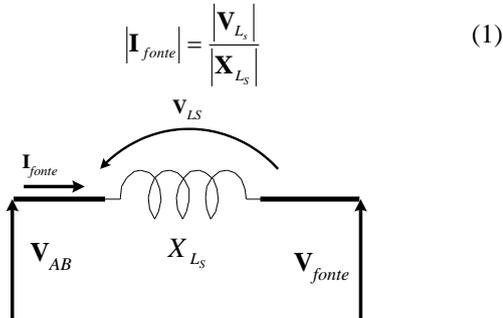


Fig. 5. Conexão entre barramento CA do CEP e rede monofásica.

Dado o valor de \mathbf{X}_{LS} , é preciso que o ângulo β e V_{AB} sejam ajustadas pelo CEP para que o FP seja unitário.

A potência a ser entregue ou absorvida da fonte é dada por (2). No entanto, tal potência é a soma da potência gerada (P_G) com a potência produzida pela fonte CC (P_{CC}), subtraída da potência consumida pelas cargas (P_L). A potência nesta seção é identificada por P_r .

$$P_{fonte} = v_{fonte} \cdot i_{fonte} = \mathbf{V}_{fonte} \cdot \mathbf{I}_{fonte} \quad (2)$$

$$P_{fonte} = P_r = P_G + P_{CC} - P_L \quad (3)$$

Fazendo as medições da corrente (Figura 3) têm-se as correntes i_{AS} e i_{CS} . Como o sistema é a 3 fios, i_{BS} é calculado de acordo com (4). As tensões v_A e v_C são medidas em relação ao ponto neutro dos capacitores do filtro. Da mesma forma, v_B é calculada através de (5).

$$i_{BS} = -(i_{AS} + i_{CS}) \quad (4)$$

$$v_B = -(v_A + v_C) \quad (5)$$

Com isso, P_r pode ser calculado de acordo com (6).

$$P_r = v_A \cdot i_{AS} + v_B \cdot i_{BS} + v_C \cdot i_{CS} \quad (6)$$

De acordo com a Figura 4.a, o ângulo β , para o qual resulta fator de potência unitário é:

$$\beta = \arctan \left(\frac{P_{fonte} \cdot |\mathbf{X}_{LS}|}{V_{fonte}^2} \right) \quad (7)$$

C. Referências de Amplitude para o CEP

Para determinar as tensões de referências para o CEP é preciso, inicialmente, medir a tensão v_{fonte} e filtrá-la para obter sua componente fundamental, v . De acordo com (8), encontra-se v'_{AB} que representa a tensão entre as fases "A" e "B" a ser produzida pelo CEP.

$$v'_{AB} = \frac{v}{\cos\beta} \quad (8)$$

Agora basta defasar adequadamente ($\beta - 30^\circ$, $\beta - 150^\circ$, $\beta + 90^\circ$) v'_{AB} e dividir seu módulo por $\sqrt{3}$ para obter as tensões de fases que servirão de referência para o CEP.

Outra possibilidade consiste em criar três senóides internamente ao processador digital, sincronizadas através de um PLL (phase locked loop) com v_{fonte} . Da mesma forma, tais senóides precisam ser defasadas em relação a v_{fonte} . A amplitude é definida por (9), na qual V representa a amplitude da tensão da rede monofásica filtrada.

$$A = \frac{V}{\sqrt{3} \cdot \cos\beta} \quad (9)$$

IV. ESTRUTURA DE CONTROLE

Para garantir a qualidade da tensão CA no barramento trifásico, tanto a corrente quanto a tensão do CEP são controladas em malha fechada, conforme mostra a Figura 6. Utiliza-se um controle em cascata, com uma malha interna de corrente, com frequência de corte em 1 kHz, e uma malha externa de tensão, com frequência de corte de 100Hz. No entanto, na presença de cargas não lineares, o emprego apenas de compensadores do tipo proporcional-integral não é capaz de garantir tensões adequadas na saída do CEP. Para se obter um melhor desempenho dinâmico, bem como reduzida distorção harmônica, são incluídas entradas antecipativas (*feedforward*) na geração das referências de corrente e de tensão.

A corrente de saída do CEP depende da diferença entre a tensão imposta pelo conversor e a tensão do barramento trifásico. Por exemplo, para uma mesma corrente, a tensão a ser produzida pelo CEP é muito diferente se a tensão CA estiver passando pelo zero ou se estiver no pico. Assim, a produção da referência de corrente, além do sinal de saída do regulador de tensão, recebe também uma informação direta da tensão de referência.

Idealmente, todos os componentes harmônicos da corrente da carga, assim como seus reativos, deveriam fluir exclusivamente pelo CEP. Entretanto, como este conversor possui uma impedância de saída finita (dada, em princípio, pelo filtro LC de saída), inevitavelmente haverá uma circulação residual dos harmônicos pelo GI e pela rede. No entanto, projetando-se tal filtro para uma baixa impedância de saída e associando-se um método de controle adequado da forma tensão, pode-se reduzir tal impedância a valores muito baixos.

Com este objetivo, para a malha de tensão tem-se uma entrada antecipativa, que traz uma informação da componente de corrente que flui pelo capacitor do filtro, além de filtros sintonizados nas frequências harmônicas mais relevantes. Tais filtros sintonizados permitem minimizar os erros de ganho e de fase decorrentes do regulador PI, resultando em uma baixa impedância de saída para o CEP nestas frequências e possibilitando uma adequada compensação das componentes harmônicas da corrente da carga. Os procedimentos de projeto destes controladores foram apresentados [17-19].

Os vários ganhos indicados na Figura 6 referem-se aos

sensores e ao escalonamento utilizado na implementação. O bloco SVM indica o uso de modulação vetorial para o comando do inversor e, dinamicamente, equivale a um ganho mais um atraso.

A. Controle da tensão do barramento CC

A estrutura de controle mostrada na Figura 6 garante a qualidade da tensão CA na saída do CEP. Entretanto qualquer desequilíbrio de potência entre a carga, rede e as fontes flui através do CEP e causa uma alteração na tensão CC.

Uma malha adicional do controle, empregando um compensador PI, com frequência de corte de 1,7 Hz foi implementada de modo a atuar apenas sobre o ângulo β e, com isso, ajustar o fluxo de potência pela rede de maneira a estabilizar V_{CC} . A baixa frequência de corte permite que este controle atue de maneira independente do controle da tensão CA.

Quando o sistema dispuser de uma fonte CC (como uma célula a combustível ou um painel fotovoltaico) sua conexão ao barramento CC do CEP se faz por meio de um conversor CC-CC elevador de tensão, controlado em corrente. Com isso, a fonte CC poderá trabalhar em um ponto de operação de alto rendimento, evitando a região de saturação. A título de ilustração, a Figura 7 apresenta o diagrama de controle onde G_{FC} , PI_{FC} e PWM_{FC} representam, respectivamente, o ganho do sensor de corrente, função de transferência do PI que controla a corrente do conversor e o ganho do PWM respectivamente.

O regulador de corrente é projetado utilizando a hipótese simplificadora de que a carga tem um comportamento puramente indutivo. I_{FC} é a corrente média sobre a indutância L_{FC} e δ é o ciclo de trabalho [17].

$$I_{FC} \cong \frac{V_{CC}}{s \cdot L_{FC}} \cdot \delta \quad (11)$$

Da mesma forma como foram determinados os compensadores para o CEP trifásico, definem-se os parâmetros margem de fase (mf_{FC}) e frequência de corte em malha fechada resultantes do uso do compensador. Os parâmetros utilizados no projeto são mostrados na Tabela II. F_{CLFC} é a frequência de corte em malha fechada do controlador de corrente, V_{FC} é a tensão de entrada do conversor e k_{lem} é o ganho do sensor de corrente.

TABELA II
Parâmetros do sistema – PI do conversor CC/CC

F_{CLFC} (Hz)	mf_{FC} (°)	V_{CC} (V)	L_{FC} (mH)	k_{lem}	V_{FC} (V)
2000	70	300	1	$1/11,75$	45

As constantes proporcional (k_{propFC}) e integral (k_{intFC}) são dependentes do ganho em malha aberta G_{OLFC} , da frequência de corte e da margem de fase desejada e são obtidas de acordo com as equações seguintes [18]:

$$k_{propFC} \cdot \frac{G_{OLFC}}{\omega_{FCLFC}} = 1 \quad (12)$$

$$k_{intFC} = k_{propFC} \cdot \frac{\omega_{FCLFC}}{\tan(mf_{FC})} \quad (13)$$

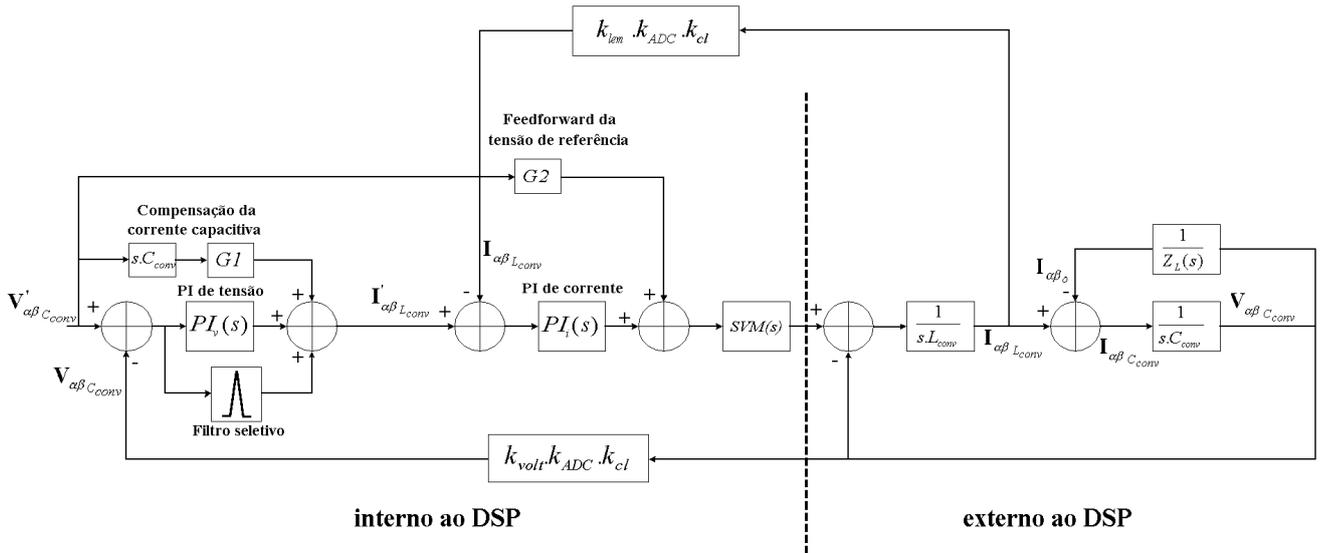


Fig. 6. Diagrama de controle da tensão de saída do CEP trifásico.

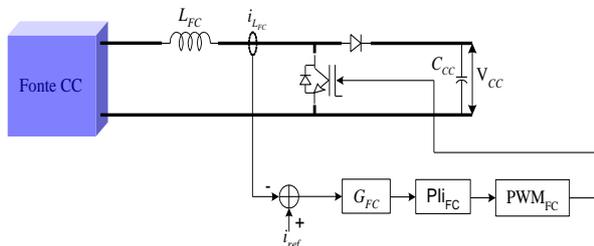


Fig. 7. Diagrama de controle do conversor CC/CC.

V. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

As estratégias para o CEP foram implementadas em um DSP de 16 bits ponto fixo da Analog Devices, ADMC 401.

As frequências de amostragem e de chaveamento foram 12 kHz para o CEP trifásico e para o conversor da fonte CC foi utilizado um circuito dedicado (3524) devido ao alto esforço do DSP em controlar o CEP. No entanto, a habilitação deste circuito é totalmente gerenciada pelo DSP.

O protótipo construído foi de 3 kVA. Os resultados serão apresentados em dois conjuntos. O primeiro refere-se a composição GI e rede monofásica. Já o segundo, GI, rede monofásica e fonte CC. O rendimento do sistema depende de quanta potência flui através dos conversores, ou seja, depende da potência gerada localmente e do consumo das cargas locais. O valor médio do rendimento do CEP foi de 94%, enquanto no conversor CC-CC foi de 85%.

A. GI e Rede Monofásica em Regime Permanente

A Figura 8 mostra tensões e correntes nos terminais GI. Como esperado, as tensões são senoidais, exceto pela presença de “ripple” residual em alta frequência. As correntes são ligeiramente distorcidas devido a não linearidades do entreferro do gerador de indução.

Na Figura 9 são mostrados resultados em que, devido à baixa potência da carga local, se envia 1600 W para a rede. Estão indicadas as seguintes formas de onda: a referência interna do DSP, v_A^* , a respectiva tensão produzida pelo CEP v_A , a corrente e a tensão na rede monofásica (i_{fonte} e v_{fonte}). Em relação à DHT, no barramento do CEP foi medido 0,9%. Na

rede monofásica a DHT da tensão é de 2,2% e de 2,28% para a corrente. O fator de potência é 0,99.

As figuras 10 e 11 mostram resultados com uma carga não linear (retificador trifásico a diodos com carga R.C). Absorve-se de 2 kW da rede. Note-se que, pela ação do filtro seletivo na 5ª harmônica presente na malha de controle indicada na Figura 6, a tensão, nesta frequência apresenta apenas 1% da fundamental, enquanto na corrente, a 5ª harmônica tem 50% do valor da fundamental.

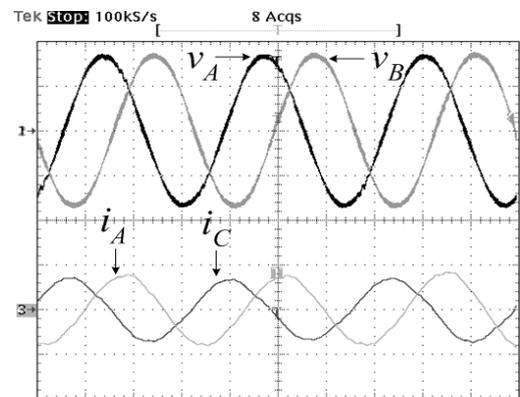


Fig. 8. Tensões (100V/div.) e correntes (10A/div.) do GI. Horizontal: 5ms/div.

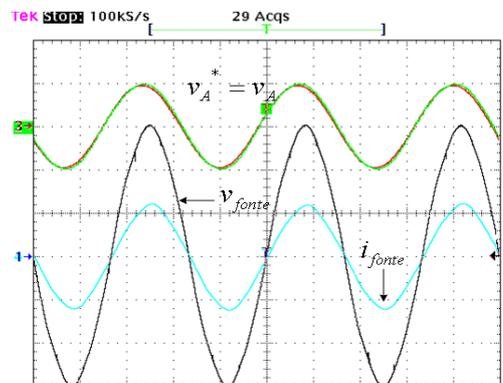


Fig. 9. Tensão de referência e tensão produzida pelo CEP (180V/div.). Tensão (100V/div.) e corrente (10A/div.) na rede monofásica. Horizontal: 5ms/div.

B. GI, Rede Monofásica e fonte CC

Neste teste uma fonte CC fornece 500 W, enquanto 700 W são absorvidos da rede monofásica. Em um determinado instante a carga é triplicada, como mostra a Figura 12. Ação do controlador PI da tensão V_{CC} faz com que o sistema altere o ponto de operação através da atualização de β , retornando-se ao valor pré-estabelecido para a tensão V_{CC} .

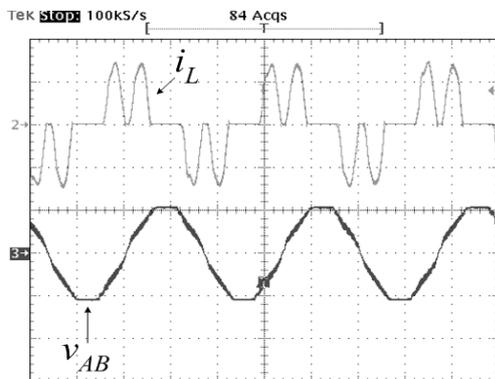


Fig. 10. Corrente de carga (5A/div.) e tensão no barramento do CEP (250V/div.). Horizontal: 5ms/div. Com compensação da 5ª harmônica.

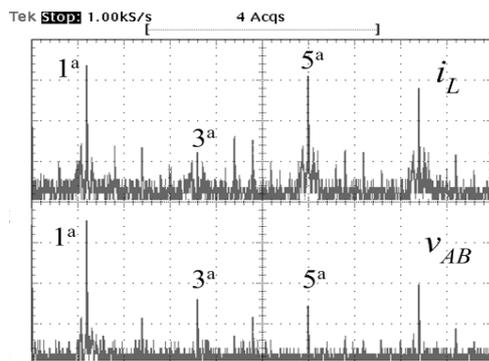


Fig. 11. Espectro de corrente de carga (20db/div.) e tensão no barramento do CEP (20db/div.). Horizontal: 50Hz/div. Com compensação da 5ª harmônica.

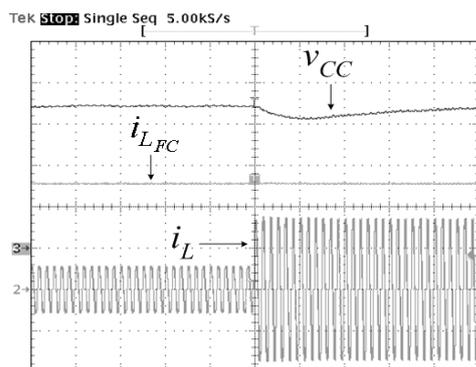


Fig. 12. Tensão no "link" CC (100V/div.), corrente drenada da fonte CC (5A/div.) e corrente na carga (5A/div.). Horizontal: 100ms/div.

Nos resultados da figura 13, a rede fornece 1200 W. Em um determinado instante, a fonte CC, que fornecia cerca de 500 W, é desconectada. Este déficit é suprido totalmente pela rede, uma vez que não existe mecanismo que atue sobre a máquina primária de forma a aumentar a potência gerada pelo GI.

Em outro teste, mostrado na Figura 14, um motor de indução trifásico de ½ CV foi conectado aos terminais do CEP sem que houvesse nenhum tipo de partida suave. No instante em que ocorre a inserção do motor, tanto a corrente proveniente da rede monofásica quanto a tensão do barramento CC sofrem alterações. Essas alterações podem ser mensuradas como um $\Delta\beta$ e, de acordo com a estratégia adotada de somente alterar o defasamento entre i_{fonte} e v_{fonte} e manter a amplitude de V_{AB} inalterada proporciona ao usuário que se utiliza deste sistema, um valor eficaz de tensão praticamente constante. Em relação ao GI não se observou nenhum indício de desmagnetização.

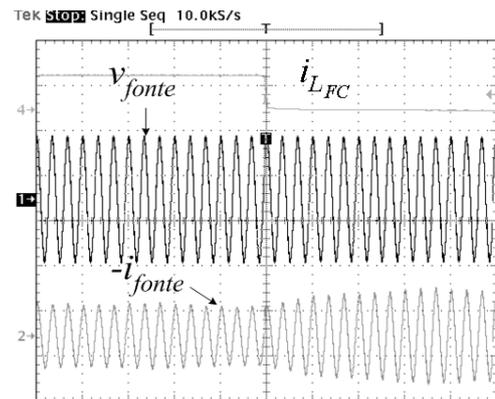


Fig. 13. Corrente drenada da fonte CC (10A/div.), tensão (200V/div.) e corrente (10A/div.) na rede monofásica. Horizontal: 50ms/div.

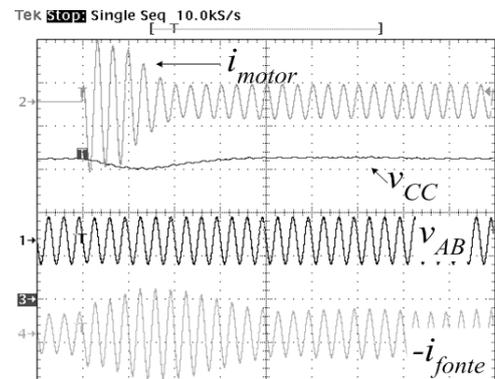


Fig. 14. Corrente no motor (5A/div.), tensão no link CC (100V/div.), tensão nos terminais do CEP (500V/div.) e corrente na rede monofásica (10V/div.). Horizontal: 50ms/div.

VI. CONCLUSÕES

Este artigo apresenta uma estratégia para compensar desequilíbrios quando um gerador de indução é conectado diretamente a uma rede monofásica. Um conversor PWM do tipo fonte de tensão estabiliza as tensões no barramento trifásico, enquanto que um conversor do tipo "boost" gerencia o fluxo de energia através da fonte CC. Através do controle da amplitude e defasagem da tensão da tensão CA é possível controlar o fluxo de energia através da rede monofásica.

Para garantir a qualidade da tensão CA foram utilizados controladores do tipo PI associados a entradas antecipativas e filtros seletivos nas frequências harmônicas mais relevantes.

Tem-se, desta forma, a interligação de diferentes fontes de energia, garantindo-se a cada uma, individualmente,

condições adequadas de funcionamento. Ao usuário conectado ao barramento trifásico, garantem-se tensões dentro dos padrões de qualidade, compensação de reativos e de harmônicos de corrente, sem necessidade de qualquer metodologia de compensação, bastando a adequada regulação da tensão CA.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CAPES e FAPESP (processos BEX0277/02-9 e 00/11038-9) pelo suporte a este projeto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] E. G. Marra, J. A. Pomilio, "Self-Excited Induction Generator Controlled by a VS-PWM Bi-Directional Converter for Rural Applications", *IEEE Transactions on Industrial Applications*, vol. 35, no. 4, pp. 877-883 July/August 1999.
- [2] D. E. Bassett, M. F. Potter, "Capacitive Excitation for Induction Generators", *AIEE Transactions*, vol. 54, pp. 540-543, 1935.
- [3] C. F. Wagner, "Self-Excitation of Induction Motors", *AIEE Transactions*, vol. 58, pp. 47-51, 1939.
- [4] E. G. Marra, J. A. Pomilio: "Self-Excited Induction Generator Controlled by a VS-PWM Converter Providing High Power-Factor Current to a Single-Phase Grid", in *Proc. of IEEE IECON*, 1998.
- [5] R. Q. Machado, E. G. Marra, J. A. Pomilio, "Balanced Operation of Three-phase Cage Induction Generation Connected to Single-phase Utility Grid", in *Proc. of COBEP*, pp. 76-81, 1999.
- [6] M. G. Simões, F. A. Farret, *Renewable Energy Systems: Design and Analysis with Induction Generators*, CRC Press, Boca Raton, 2004.
- [7] E. G. Marra, J. A. Pomilio, "Induction-generator-based system providing regulated voltage with constant frequency", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 47, no. 4, pp. 908-914, Aug. 2000.
- [8] R. Q. Machado, E. G. Marra, J. A. Pomilio, "Bi-directional Electronic Interface of Induction Generator Connected to a Single-Phase Feeder", *International Journal of Renewable Energy Engineering*, vol. 4, no. 2, pp. 465-471, August 2002.
- [9] V. M. Pereira, J. A. Pomilio, P. A. V. Ferreira, "Experimental Setup for Autonomous Induction Generator System with Voltage and Frequency Regulation Studies", in *Proc. of WSEAS International Conference on Power Engineering Systems - ICOPES '02*, October 2002.
- [10] Série de estudos e informações hidrológicas e energéticas. ANEEL - Agência nacional de energia elétrica, 1998.
- [11] W. A. Moncrief, "Practical application and selection of single-phase to three-phase converters", in *Proc. of IEEE IAS*, pp. D3-1/D3-9, 1996.
- [12] T. F. Chan, "Effect of rotational direction on the performance of a three-phase induction generator connected to a single-phase power system", in *Proc. of IEEE IEMDC*, pp. MB1-6.1-MB1-6.3, 1997.
- [13] M. O. Durham, R. Ramakuma, "Power system balancers for an induction generator", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. IA-23, no. 6, pp. 1067-1072, 1987.
- [14] C.P. Steinmetz, *Theory and Calculations of Alternating Current Phenomena*, McGraw-Hill Co., 1923.
- [15] R. Q. Machado, S. Buso, J. A. Pomilio, F. P. Marafão, "Three-Phase to Single-Phase Direct Connection for rural co-generation systems", in *Proc. of IEEE APEC*, 2004.
- [16] R. Q. Machado, J. A. Pomilio, S. Buso, F. P. Marafão, "Electronic Control of a Three-Phase Induction Generator Directly Connected to a Single-Phase Feeder", in *Proc. of COBEP*, pp. 651-656, 2003.
- [17] R. Q. Machado, S. Buso, J. A. Pomilio, "A Line-Interactive Single-Phase to Three-Phase Converter System", in *Proc. of PESC*, pp. 753-758, 2004.
- [18] G. Spiazzi, P. Mattavelli, L. Rossetto, "Methods to Improve Dynamic Response of Power Factor Pre-regulator: an Overview", in *Proc. of EPE*, 1995.
- [19] R. Q. Machado, S. Buso, J. A. Pomilio, "Three-Phase Induction Generator and DC Source Connected to a Single-Phase Feeder", in *Proc. of INDUSCON*, 2004.

DADOS BIOGRÁFICOS

Ricardo Quadros Machado, é natural de Santa Maria, graduou-se engenheiro eletricista (1997) pela Univ. Federal de Santa Maria, Mestre (2002) e Doutor em Engenharia Elétrica (2005) pela Universidade Estadual de Campinas.

Entre 2003 e 2004 foi pesquisador visitante junto ao grupo de Eletrônica de Potência da Univ. de Pádua, Itália. Atualmente atua como pesquisador junto CEEMA (Centro de Estudos em Energia e Meio-Ambiente) e PPGEE (Programa de Pós-Graduação em Eng. Elétrica) da UFSM. Suas áreas de interesse são: controle digital aplicado à eletrônica de potência, qualidade do processamento da energia elétrica, filtros ativos e fontes alternativa de energia.

Dr. Machado é membro da SOBRAEP.

Simone Buso, nasceu em Pádua, Itália, em 1968. Em 1992 graduou-se "cum laude" em Engenharia Eletrônica na Universidade de Pádua.

Trabalhou na Ansaldo Ricerche, em Gênua, Itália na pesquisa de novas topologias de conversores para acionamentos de alta potência. Em 1996 recebeu o título de Doutor pela Universidade de Pádua. Desde 1997 é pesquisador e docente junto ao Departamento de Engenharia da Informação da mesma Universidade.

José Antenor Pomilio, graduado em Eng. Elétrica pela UNICAMP em 1983. Concluiu o Mestrado (1986) e o Doutorado (1991) pela mesma universidade.

Entre 1988 e 1991, foi chefe do grupo de Eletrônica de Potência do Laboratório Nacional de Luz Síncrotron. Realizou estágios de pós-doutoramento junto à Universidade de Pádua, em 1993/94 e junto à Terceira Universidade de Roma, em 2003. É professor titular da Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da UNICAMP.

Foi membro do Comitê Administrativo da IEEE Power Electronics Society e presidente da SOBRAEP. É editor de Eletrônica de Potência (2005) editor associado da IEEE Trans. on Power Electronics e da revista Controle & Automação. É membro da SOBRAEP, do IEEE e da SBA.