Sistema de Geração Monofásico com Conversão para Trifásico Usando Quantidade Reduzida de Componentes

T. M Oliveira[1], C.B. Jacobina[1] e M. B. R. Correa[2]
[1]UFPB/CCT/DEE/LEIAM - CampusII - Caixa Postal 10105
58.109-970 Campina Grande, PB, Brasil.
Fax: +55-83-3101015 - (talvanes,jacobina@dee.ufpb.br)
[2]ETFAL - Palmeira dos Índios, AL

Resumo **- O uso de máquina assíncrona monofásica operando como gerador e acoplada a uma rede monofásica é investigado neste artigo. O sistema é constituído de um gerador ligado a carga por um inversor trifásico com número reduzido de componentes. As tensões e a frequência nos terminais da carga são reguladas de modo a serem fixas. Na entrada do gerador a corrente opera em fase com a tensão. O estudo deste sistema é realizado por meio de simulação digital.**

I. INTRODUÇÃO

No meio rural é comum a utilização de linhas de transmissão de energia por meio de redes monofásicas com um ou dois fios condutores, resultando na redução de custo de instalação da mesma. Algumas vezes é impraticável o uso de linha de transmissão para sistemas remotos e a operação destes se dá com gerador/carga isolados. Várias publicações relativas ao emprego de geradores de indução e síncrono para sistemas isolados têm sido apresentadas na literatura técnica. Operando como gerador, a máquina de indução pode estar conectada a uma rede elétrica, [1], [2], [3], [4]. Entretanto, a operação em sistemas de potência isolados com auto excitação é a mais difundida, [5], [6], [7], [8], [9], [10] e [11].

Com os recentes progressos na tecnologia de dispositivos semicondutores de potência os avanços nos métodos de controle em eletrônica de potência, fontes de alimentação de corrente alternada com inversores de freqüências têm sido adotadas para uma larga variedade de aplicações. O interesse crescente por sistemas de controle de baixo custo vem influenciando cada vez mais no desenvolvimento de topologias de sistemas com custo reduzido. Todavia a redução do número de componentes do sistema com conversor estático é possível quando são consideradas alternativas para o conversor constituído de ponte retificadora mais inversor trifásicos Em [4], [10], [11], [12], [13], [14], [15] e [16]. [17], [18] e [19] apresentam algumas topologias de circuitos de conversão de monofásico para trifásico. Nestas topologias são empregadas quantidades reduzidas de componentes, no entanto, sem comprometer a tensão de saída trifásica.

Neste trabalho são estudados sistemas de co-geração a partir de uma fonte monofásica utilizando topologias de inversores com número reduzido de componentes. Como gerador é utilizado uma máquina de indução monofásica operando em paralelo com a rede monofásica e como carga é utilizado um motor indução trifásico. Na topologia proposta para o conversor é possível o controle das chaves para se obter corrente senoidal na fonte em fase com a tensão.

II. SISTEMAS DE GERAÇÃO

A Fig. 1 ilustra a topologia de um conversor em meia ponte totalmente controlado para converter a fonte monofásica disponível em uma saída trifásica equilibrada com tensão e freqüência fixas. As chaves q_1 e q_3 são controladas de modo a se definir a forma de onda da corrente na fonte e q_2 e q_4 são controladas usando-se uma técnica de modulação de largura de pulso de modo a gerar a tensão v_{s20}. O padrão de modulação utilizado nas chaves q_1 e q_3 é calculado de modo a se ter as ondas de corrente e de tensão na fonte monofásica em fase. O indutor L_0 provê um filtro para os harmônicos e R_0 é a resistência intrínsica do indutor.

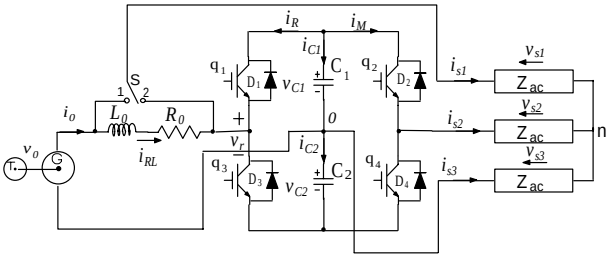


Figura 1 Sistema com gerador monofásico com conversão para sistema trifásico equilibrado

No circuito ilustrado a chave S nas posições 1 ou 2 define duas topologias distintas do sistema de co-geração.

A. Caso A: Sistema I

Quando $S = 1$, a topologia é similar a apresentada por [19]. Na conversão de fonte monofásica para trifásica, obtém-se as equações (1) a (10) para tensões e as equações (11) a (15) para correntes:

$$v_{s10} = v_0 \tag{1}$$

$$v_{s20} = q_2 v_{c1} - (1 - q_2)\, v_{c2} \tag{2}$$

$$v_{s30} = 0 \tag{3}$$

$$v_{s1} + v_{s2} + v_{s3} = 0 \tag{4}$$

$$v_{s1} = v_{s10} + \Delta 0_n \tag{5}$$

$$v_{s2} = v_{s20} + \Delta 0_n \tag{6}$$

$$v_{s3} = v_{s30} + \Delta 0_n \tag{7}$$

$$\Delta 0_n = -\frac{1}{3}\left(v_{s10} + v_{s20} + v_{s30}\right) \tag{8}$$

$$v_{ro} = q_1 v_{c1} - (1 - q_1)\, v_{c2} = v_r \tag{9}$$

$$v_0 = R_0 i_{RL} + L_0 \frac{di_{RL}}{dt} + v_r \tag{10}$$

$$i_R = q_1 i_{RL} \tag{11}$$

$$i_M = q_2 i_{s2} \tag{12}$$

$$i_0 = i_{s1} + i_{RL} \tag{13}$$

$$i_{c1} = i_R - i_M \tag{14}$$

$$i_{c2} = -i_{s3} - i_0 + i_{c1} \tag{15}$$

B. Caso B: Sistema II

Quando $S = 2$, obtém-se as equações (16), (17) e (18) que substituem as equações (1), (11) e (13) do sistema I, respectivamente.

$$v_{s10} = v_r \tag{16}$$

$$i_R = (i_{RL} - i_{s1})\, q_1 \tag{17}$$

$$i_0 = i_{RL} \tag{18}$$

A partir das equações apresentadas são obtidos os modelos de operação em regime permanente e dinâmico para cada sistema.

III. EQUAÇÕES CARACTERÍSTICAS DE REGIME PERMANENTE

A. Sistema I

Na Fig. 2, são ilustrados os diagramas elétrico e vetoriais para o sistema I. Assumindo que as grandezas são

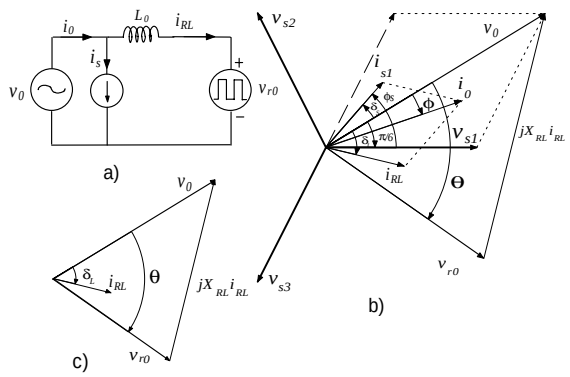


Figura 2 Diagramas elétrico e vetorial para o sistema de geração com a chave S na posição 1: a)diagrama elétrico monofásico equivalente; b) e c) diagramas fasoriais.

fasores complexos, é possível encontrar que

$$\overrightarrow{I}_{o,1} \lfloor \phi = \frac{\overrightarrow{V}_{o,1} \lfloor 0^o - \overrightarrow{V}_{ro,1} \lfloor -\theta}{jX_{rl}} + \overrightarrow{I}_{s,1} \lfloor \delta_s \tag{19}$$

e a potência ativa que flui da fonte monofásica é

$$P_{1o} = \frac{V_o V_{ro}}{X_{rl}} sen\,(\theta) + P_{c1} \tag{20}$$

onde $P_{c1} = V_s I_s \cos(\delta_s)$ é a potência ativa monofásica entregue à carga.

Pode-se mostrar que a tensão da fase 1 da carga é dada por $\overrightarrow{V}_{s1} = V_s \lfloor -\frac{\pi}{6} = \frac{V_o}{\sqrt{3}} \lfloor -\frac{\pi}{6}$, e portanto, P_{c1} pode ser expresso como

$$P_{c1} = \frac{3}{2} V_s I_s \cos(\phi_s) + \frac{\sqrt{3}}{2} V_s I_s sen\,(\phi_s) \tag{21}$$

ou

$$P_{c1} = \frac{1}{2} P_{1m} - \frac{1}{2\sqrt{3}} Q_{1m} \tag{22}$$

onde, ϕ_s, P_{1m} e Q_{1m} são ângulo de fator de potência, potência ativa e potência reativa da carga. Considerando as perdas ativas no conversor desprezíveis, a potência ativa da fonte é entregue a carga, ou seja $P_{1o} = P_{1m}$. Neste caso,

$$\theta = sen^{-1}\left(\frac{\left(P_{1m} + \frac{Q_{1m}}{\sqrt{3}}\right) X_{rl}}{2KV_o^2} \right) \tag{23}$$

onde K é definido a partir dos valores máximos das tensões da fonte e do capacitor, ou seja

$$K = \frac{\sqrt{2} V_{ro}}{\sqrt{2} V_o} \tag{24}$$

Por outro lado, é possível obter uma expressão para o ângulo de fator de potência da fonte, tal que

$$\phi = tg^{-1}\{ \frac{2KV_o^4}{2KV_o^2 X_{rl} P_{1o}} - \frac{KV_o^2[\sqrt{4K^2V_o^4 - (\frac{Q_{1m}}{\sqrt{3}} + P_{1o})^2 X_{rl}^2} + X_{rl}(Q_{1m} - \frac{P_{1o}}{\sqrt{3}})]}{2KV_o^2 X_{rl} P_{1o}} \} \tag{25}$$

onde $fp = \cos(\phi)$. De modo que se tenha o sistema operando com fator de potência unitário impõe-se $\phi = 0^0$ e a magnitude de K é expressa por

$$K = \frac{\sqrt{3V_o^4 - V_o^2 X_{rl}\left(3Q_{1m} - \sqrt{3}P_{1o}\right) + X_{rl}^2\left(Q_{1m}^2 + P_{1o}^2\right)}}{\sqrt{3}V_o^2} \tag{26}$$

B. Sistema II

Na Fig. 3 são ilustrados os diagramas elétrico e vetoriais para o sistema operando com a chave S na posição 2. A partir dos diagrama elétrico se obtem

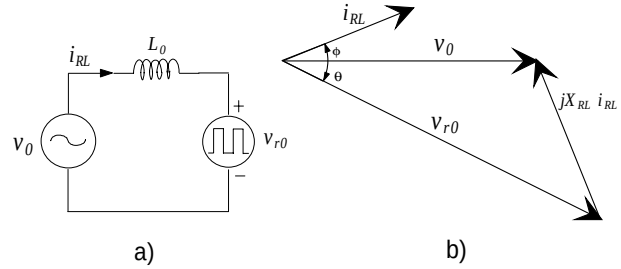


Figura 3 Diagramas elétrico e vetorial para o sistema de geração com a chave S na posição 2: a)diagrama elétrico monofásico equivalente; b) diagrama fasorial.

$$\overrightarrow{I}_{rl} \lfloor \phi = \frac{\overrightarrow{V}_o \lfloor 0^o - \overrightarrow{V}_{ro} \lfloor -\theta}{jX_{rl}} \tag{27}$$

e a potência ativa que flui da fonte monofásica é

$$P_{2o} = \frac{V_o V_{ro}}{X_{rl}} sen\,(\theta) \tag{28}$$

Por outro lado, é possível obter as expressões para ângulo de fator de potência e para fator de potência da fonte,

$$\phi = tg^{-1}\left(\frac{V_o^2 - \sqrt{K^2V_o^4 - P_{2o}^2X_{rl}^2}}{P_{2o}X_{rl}}\right) \tag{29}$$

ou

$$fp = \frac{P_{2o}X_{rl}}{V_o\sqrt{(1+K^2)\,V_o^2 - 2\sqrt{K^2V_o^4 - P_{2o}^2X_{rl}^2}}} \tag{30}$$

De modo que se tenha o sistema operando com fator de potência unitário impõe-se $\phi = 0^0$ e a magnitude de K é expressa por

$$K = \frac{1}{V_o^2}\sqrt{P_{2o}^2X_{rl}^2 + V_o^4} \tag{31}$$

O desenvolvimento das equações que descrevem a operação de regime permanente são obtidas como $f\,(P_{1o}, Q_{1m}, X_{rl}, K, V_o)$ no caso do sistema I e como $f\,(P_{2o}X_{rl}, K, V_o)$ no caso do sistema II. Para se traçar as características de operação do sistema I é necessário conhecer mais uma variável do sistema que é a potência reativa consumida pela carga. Já no sistema II não existe esta dependência.

IV. SISTEMA DE CONTROLE

Em regime dinâmico são estudadas as respostas aos transitórios de carga ou seja, conjugados distintos aplicados ao eixo do motor de indução trifásico. Para o conversor é considerado o mesmo padrão de modulação e controle de fator de potência, em ambos os sistemas. Ambos, retificador e inversor operam na freqüência de chaveamento de $10kHz$. Para se obter fator de potência unitário e uma tensão cc controlada num valor de referência v_c^* é proposto uma malha de regulação, ilustrada na Fig. 4. A partir da medição da tensão cc, v_c, esta é comparada com v_c^* e o erro é processado por meio de um regulador do tipo PI cuja saída é a amplitude da corrente de referência do gerador. Por outro lado, realiza-se a medição da corrente e do ângulo de fase da tensão do gerador os quais possibilitam determinar o erro de corrente no gerador. O valor deste erro define o padrão de chaveamento dos dispositivos do retificador, q_1 e q_3.

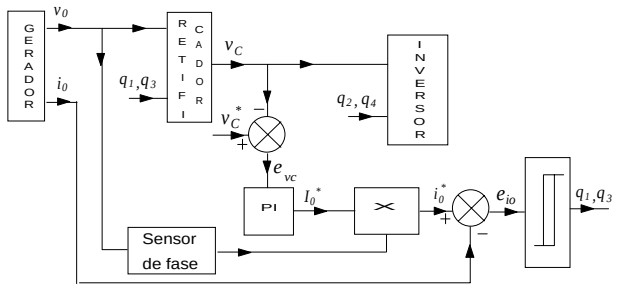


Figura 4 Diagrama de controle

V. CARACTERÍSTICAS DE REGIME PERMANENTE

A partir das equações características de cada sistema são traçados ábacos que definem a operação destes. As seguintes quantidades são definidas no sistema por unidade: potência aparente trifásica na saída $= 1pu$; tensão de linha de saída (em rms) $= 1pu$ e corrente de linha da carga trifásica $= 0,577pu$. A partir destes ábacos determina-se os pontos de operação estáveis do sistema de conversão.

A. Regime Permanente - Sistema I

Considerando o fator de potência da fonte unitário, equação (26) é estudada a operação do sistema quando. Deste modo obtendo-se o valor da constante K para potência ativa (P_o) variável na saída da fonte.

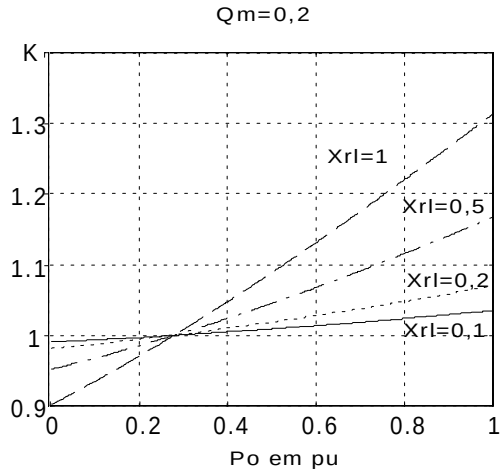


Figura 5 Variação de K versus potência ativa da fonte para valores constantes de Qm e Xrl

Na Fig. 5 são ilustradas as curvas que descrevem o comportamento de K mantendo a componente de potência reativa (Q_m) do sistema constante e igual a $0,2pu$ e valores de X_{rl} de $0,1pu$ a $1pu$. Observa-se que o aumento da potência ativa implica no aumento de K, o que também ocorre quando se faz a potência ativa constante e aumenta-se X_{rl}. A Fig. 6 ilustra esta mesma característica quando $Q_m = 0,3$. A partir de

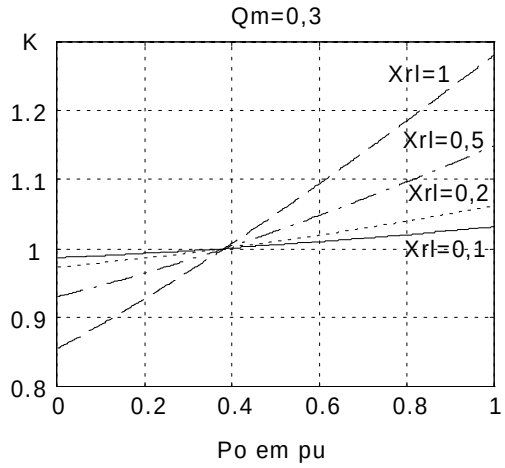


Figura 6 Variação de K versus potência ativa da fonte para valores constantes de Qm e Xrl

(25) são traçadas as curvas características de fator de

potência na fonte versus potência ativa. Nas Figs. $7a$ e $7b$ são ilustradas as características para $Q_m = 0,2pu$ e $X_{rl} = 0,1$ a $0,2pu$. A escolha de K define o fator de potência de operação da fonte, o qual varia para cada valor de potência ativa. Entretanto, pode-se observar que existe sempre um valor de K que define fator de potência unitário para qualquer valor de potência ativa fornecida pela fonte, mesmo nos casos em que se tem a carga solicitando basicamente potência reativa. Isto pode ser visto nas Figs. $7a$ e $7b$ nas curvas tracejadas os pontos de operação próximo a origem, quando $P_o \to 0$. Nas Figs. $8a$ e $8b$ são ilustradas as características para

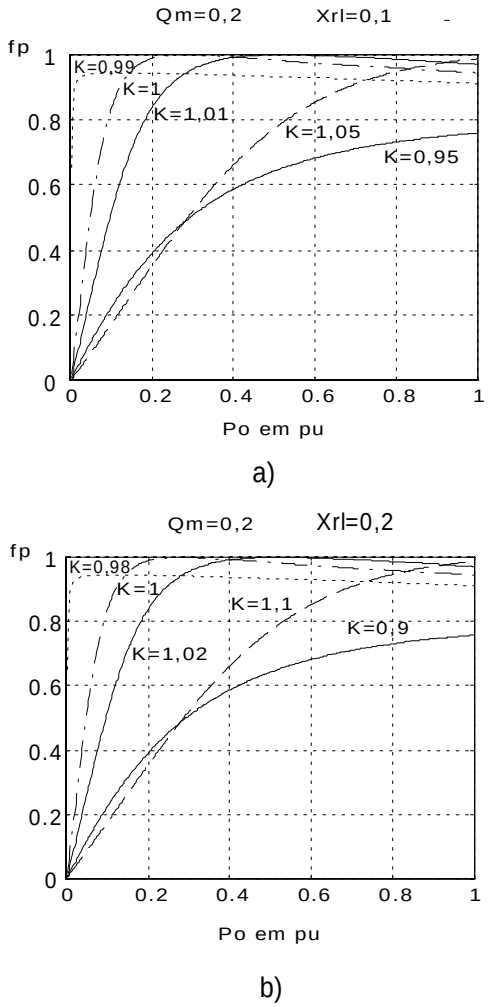


Figura 7 Variação de fp versus potência ativa da fonte para valores constantes de Qm, Xrl e K

$Q_m = 0,3pu$.

B. Regime Permanente - Sistema II

A partir da equação (31) traçam-se as curvas características de $K = f(P_o, X_{rl}, V_o)$ ilustradas na Fig. 9. Na Fig. 9, as curvas que descrevem o comportamento de K mostram que o aumento da potência ativa implica no aumento de K. O que também ocorre quando se faz a potência ativa constante e aumenta-se X_{rl}. No entanto, a escolha de $X_{rl} = 0,1$ ou $0,2$ implica no valor de K sempre próximo da unidade. Considerando, portanto, $K = 1$, a partir da equação (30) são traçadas as curvas características de fator de potência na fonte versus potência ativa. A Fig. 10 ilustra as características para $X_{rl} = 0,1; 0,2; 0,5$ e $1pu$. A escolha de K define o fator de potência de operação da fonte, o qual varia para cada valor de potência ativa. A escolha de $X_{rl} = 0,1$ ou $0,2$ mostra que o fator de potência é muito próximo

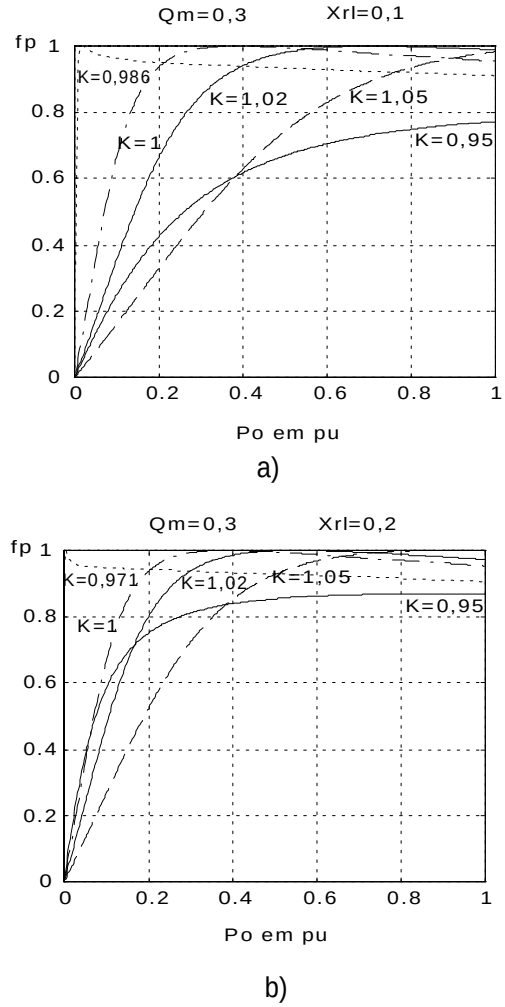


Figura 8 Variação de fp versus potência ativa da fonte para valores constantes de Qm, Xrl e K

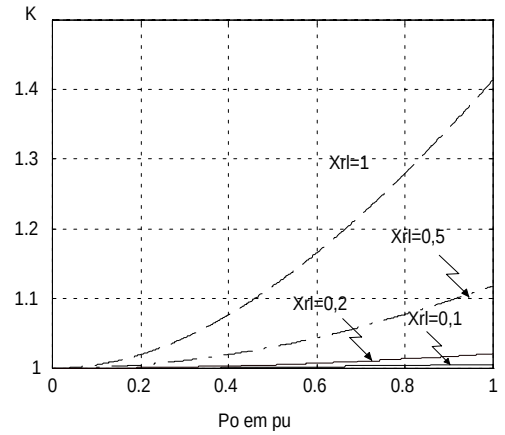


Figura 9 Variação de K versus potência ativa da fonte para valores constantes de Xrl

da unidade, $0,995 < fp < 1$, para qualquer valor de potência fornecida.

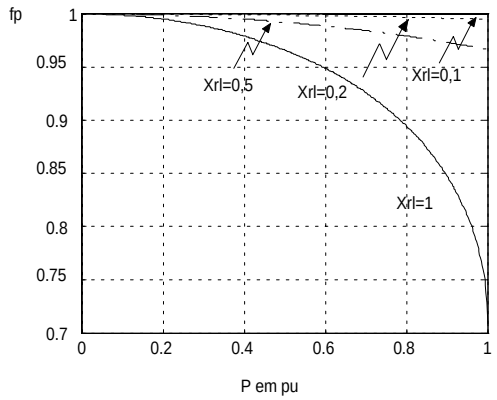


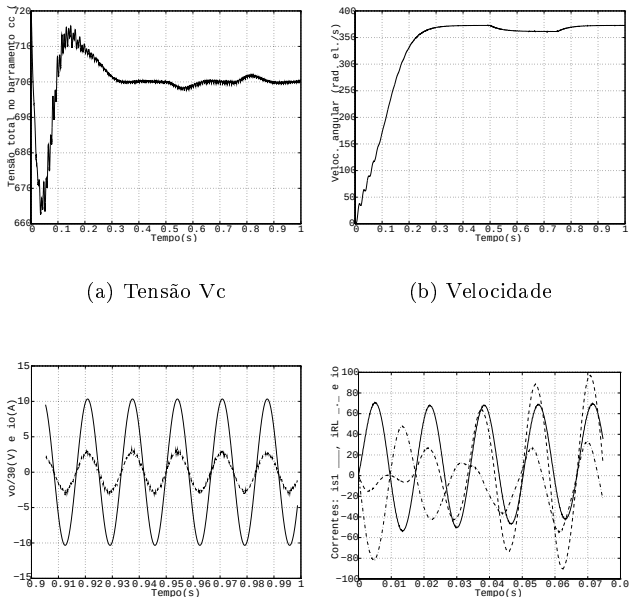
Figura 10 Variação de fp versus potência ativa da fonte para valores constantes de Xrl e K

VI. CARACTERÍSTICAS DE OPERAÇÃO DINÂMICA

O controle da tensão de linha na carga, $v_{13} = v_{10} - v_{30}$, com referência ao ponto central dos capacitores pode ser definida pelo padrão de modulação aplicado as chaves q_2 e q_4, [10].

A utilização de um filtro indutivo com valor elevado, $X_{rl} \approx 1pu$, favorece a eliminação de ruído de baixa freqüência. No entanto, isto impõe a utilização de valor de tensão de referência no barramento cc muito elevada e em conseqüência existe a necessidade de usar banco de capacitores maiores. Porém, a utilização de $X_{rl} \approx 0,1pu$ resulta na não filtragem dos ruídos de ordem inferior produzidos pelo chaveamento, mas o banco de capacitores utilizado é menor. Estas características são avaliadas na operação em regime dinâmico considerando indutância de filtro $L_o = 2,00mH$ e dois bancos de capacitores iguais, C_1 e C_2, de $15000\mu F$.

A carga é composta de um motor de indução trifásico. O motor parte em vazio e no instante $t = 0,5s$ uma carga mecânica de $5Nm$ é conectada ao eixo, de modo que se possa ter o sistema operando com fator de potência na carga variável. No instante $t = 0,75s$ o motor volta a operar em vazio. Considerando as mesmas condições de cargas descritas, nas Figs. 11 e 12 são ilustradas as curvas que descrevem o funcionamento em regime dinâmico dos sistemas I e II, respectivamente. Na Fig. $11a$ é traçada a característica da tensão no barramento cc soma das tensões v_{c1} e v_{c2}. Nesta é possível observar que a tensão é regulada no valor de referência desejado, $700V$, mesmo com variação de carga, como pode também ser observado na Fig. $12a$. Entretanto, para o sistema II existe uma pequena redução no pico de tensão durante o transitório de partida. Na Fig. $11b$ é ilustrada a curva de velocidade mecânica do motor, obtendo-se boa estabilidade mecânica do sistema, não se observando nenhuma diferença com a característica de velocidade ilustrada na Fig. $12b$ referente ao sistema II. Na Fig. $11c$ são ilustradas as curvas sobrepostas das características tensão do gerador e corrente do gerador, com escala de tensão de 1:30 de modo a se ter melhor visualização do ângulo de defasagem entre as curvas. O período ilustrado corresponde a faixa da operação em vazio, período em que se tem o mais baixo fator de potência para a carga. Observando-se que tensão e corrente estão em fase, e o sistema opera com fator de potência unitário. A figura $12c$ ilustra esta mesma característica para o sistema II, não se observando diferença entre esta e a do sistema I. As curvas da Fig. $11d$ ilustram a sobreposição das características corrente de carga, corrente na reatância X_{rl} e corrente no gerador. Nesta figura observa-se que a corrente no gerador possui amplitude menor que a corrente de carga, o que se justifica pela presença do termo de corrente proveniente do capacitor que fornece o reativo necessário para a carga.



(a) Tensão Vc

(b) Velocidade

(c) v e i na fonte

(d) Correntes: na carga, em Xrl e na fonte

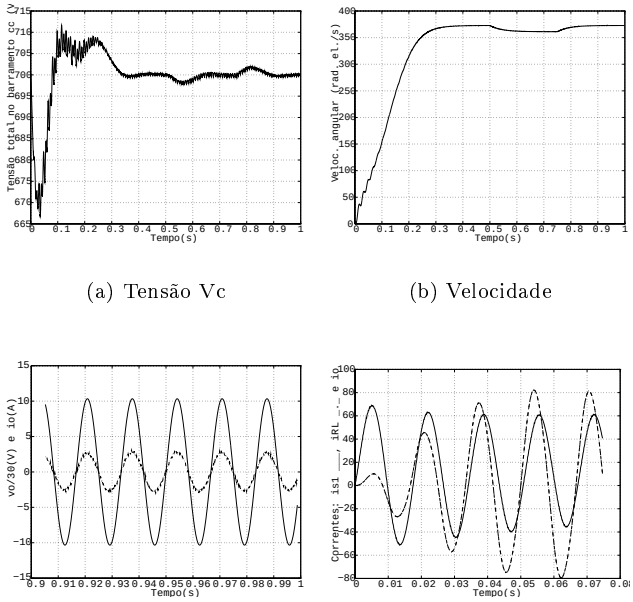
Figura 11 Características de operação dinâmica do sistema I

As curvas da Fig. $12d$ ilustram a sobreposição das características corrente de carga, corrente na reatância X_{rl} e corrente no gerador para o sistema II. Nesta Fig. observa-se que a corrente no gerador possui amplitude menor que a corrente de carga, devidoa presença do termo de corrente proveniente do capacitor que fornece o reativo necessário para a carga.

VII. CONCLUSÕES

Neste trabalho é estudada uma nova topologia de sistema de geração monofásica com conversão para trifásico com número de dispositivos reduzido representado pelo sistema II.

A partir dos ábacos que descrevem a operação em regime permanente para ambos os sistemas, a estrutura proposta apresenta vantagem para operação com fator de potência unitário. No sistema proposto, o controle do fator de potência se dá sem o necessário conhecimento da potência reativa fornecida à carga. Observa-se, também,



(a) Tensão Vc

(b) Velocidade

(c) v e i na fonte

(d) Correntes: na carga, em Xrl e na fonte

Figura 12 Características de operação dinâmica do sistema II

que ao escolher X_{rl} entre $0,1$ e $0,2pu$ a variação de K é muito pequena. Isto resulta num valor de tensão de referência no capacitor com menor amplitude.

Para operação dinâmica, o sistema proposto apresentou boa resposta ao transitório de carga, bem como garantiu corrente senoidal com fator de potência unitário. Os resultados de simulação apresentados mostrou que os sistemas discutidos operam conforme o esperado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Brennen, M. B. e Abbondanti, A. Static exciter for induction generator. *IEEE Transactions on Industry Application*, 13, n. 5, 422–428, Sept/Oct 1977.

[2] Yamamoto, M. e Motoyoshi, O. Active and reactive power control for a doubt-fed wound rotor induction generator. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 6, n. 4, 624–629, Aug 1991.

[3] Shibata, F. e Taka, K. A self-cascade inducion generator combined with a separately controlled converter and syncrhoonous condenser. *IEEE Transactions on Industy Applicatons*, 28, n. 4, 797–807, Aug 1992.

[4] Marra, E. G. e Pomilio, J. A. Self-excited induction generator controlled by a vs-pwm converter providing high power-factor current to a single-phase grid. In: *IECON*, p. 703–708, Aachen-Germany, 1998.

[5] Irfan, A. e Lipo, A. T. Control of polyphase induction generator/induction motor power conversion system completely isolated from the utility. *IEEE Transactions on Industy Applicatons*, 30, n. 3, 636–647, June 1994.

[6] Muljadi, E. R. e Lipo, A. T. Series compensated pwm inverter with battery suply applied to na isolated induction generator. *IEEE Transactions on industy applicatons*, 30, n. 4, 1073–1082, July 1994.

[7] Silva, S. R. e Lyra, R. O. C. Pulse width modulation exciter for flux control of na isolated induction generator. In: *EPE Conference*, p. 3233–3228, Sevilla-Spain, 1995.

[8] Lyra, R. O. C. e Silva, S. R. Vector control techniques for isolated induction generator feeding dc and ac loads. In: *III COBEP*, p. 85–90, S. Paulo-BR, 1995.

[9] Jacobina, C. B., da Silva, E. R. C., Lima, A. M. N. e Ribeiro, R. L. A. Induction generator static systems with a reduced number of components. *IEEE Proceedings of the IAS Record*, 1, n. 4, 432–439, Oct 1996.

[10] Alan, I. e Lipo, T. A. Control of a polyphase induction generator/induction motor power conversion system completely isolated from the utility. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 30, n. 3, 636–647, may/june 1994.

[11] Pena, A., Clare, J. C. e Asher, G. M. A doubly fed induction generator using back-to-back pwm converter supplying and isolated load from a variable speed wind turbine. *IEE Proc. Elect. Power Applications*, 143, n. 5, 380–387, september 1996.

[12] Chen, C., Divan, D. M. e Novotny, D. W. A hibrid inverter/cycloconverter-based variable-speed three-phase induction motor drive for single-phase inputs. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 31, n. 3, 630–635, may/june 1995.

[13] Sander-Larsen, J., Jespersen, K. e Pedersen, M. R. Control of a complete digital-based component-minimized single-phase to three-phase ac/dc/ac converter. In: *IECON*, p. 618–625, Aachen-Germany, 1998.

[14] Jacobina, C. B., da Silva, E. C., Lima, A. M. N. e Ribeiro, R. L. A. Induction generator static systems with a reduced number of components. In: *31st IAS Annual Meeting*, p. 432–439, California-USA, 1996.

[15] Jacobina, C. B., da Silva, E. C., Lima, A. M. N. e Ribeiro, R. L. A. Vector and scalar control of a four switch three phase inverter. In: *30th IAS Annual Meeting*, p. 2422–2429, Florida-USA, 1995.

[16] Blaadjerg, F., Freysson, S., Hansen, H. H. e Hansen, S. A new optimized space-vector modulition strategy for a component-minimized voltage source inverter. *IEEE Transactions on Power Eletronics*, 12, n. 4, 704–714, july 1997.

[17] Broeck, H. W. V. D. e Wyk, J. D. V. A comparative investigation of a three-phase induction machine drive with a component minimized voltage-fed inverter under different control options. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 20, n. 2, 309–320, march/april 1984.

[18] Enjeti, P. N. e Rahman, A. A new single-phase to three-phase converter with active input current shaping for low cost ac motor drives. *IEEE Transactions on Industry Application*, 29, n. 4, 806–813, July/August 1993.

[19] Enjeti, P. N., Rahman, A. e Jakkli, R. Economic single-phase to three-phase topologies for fixed and variable frequency output. *IEEE Transactions on Power Eletronics*, 8, n. 3, 329–335, July 1993.