

ESTRATÉGIA DE AJUSTE AUTOMÁTICO DA COMPENSAÇÃO DE DISTÚRBIOS BASEADA NA CORRENTE NOMINAL DE INVERSORES MULTIFUNCIONAIS

JAKSON PAULO BONALDO

*Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Mato Grosso
Av. Fernando Corrêa da Costa, 2367, Cuiabá, MT, 78060-900
E-mail: jaksonpaulo@ufmt.br*

GILSON JUNIOR SCHIAVON

*Departamento de Engenharia Eletrônica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Via Rosalina Maria dos Santos, 1233, Campo Mourão, PR, Brasil, 87301-899
E-mail: gilsonschiavon@utfpr.edu.br*

JOSÉ ANTENOR POMILIO

*Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas
Av. Albert Einstein, 400, Campinas, SP, Brasil, 13083-852
E-mail: antenor@fee.unicamp.br*

HELMO K. MORALES-PAREDES

*Grupo de Automação e Integração de Sistemas, Universidade Estadual Paulista (UNESP)
Av. Três de Março, 511, Sorocaba, SP, Brasil, 18087-180
E-mails: helmo.paredes@unesp.br*

Abstract— In this work it is proposed a control strategy aiming the adjustment of the output current of a multifunctional inverter used to tie renewable sources to the electric grid. As a multifunctional device, the inverter also performs ancillary tasks such as harmonic and reactive compensation. Once the main objectives of the disturbances compensation are defined, a current reference is synthesized. In the proposed strategy, priority is given to the injection of the energy generated by the renewable sources. This approach is feasible because only the current component related to the compensation objectives is limited through the dynamic adjustment in the amplitude of the compensation current. This adjustment is performed by the multiplication of the current reference with a gain k , which is defined according to the remaining current capacity of the inverter, i.e. the current capacity not used to inject active power. The proposed strategy is validated by simulation and experimental results obtained considering a grid-tie multifunctional converter and non-linear local load with capacitive behavior.

Keywords— Multifunctional Grid-Tied Inverters, Multi-objective Compensation, Power Quality, Renewable Energy Sources.

Resumo— Este artigo propõe uma estratégia de controle para ajustar a amplitude da corrente de saída de um inversor multifuncional usado para conectar fontes renováveis de energia na rede elétrica e prover serviços auxiliares, tal como compensação de harmônicas e reativos. Uma vez definidos os objetivos da compensação, a referência de corrente é gerada. Com base na estratégia proposta, a prioridade é a injeção da energia oriunda da fonte local. Esta abordagem permite que apenas a parcela de corrente relacionada aos objetivos de compensação seja limitada através do ajuste dinâmico da amplitude da corrente de compensação. O ajuste é realizado através da ponderação do sinal de referência por um ganho k , que é definido conforme a capacidade de corrente remanescente do conversor, isto é, a capacidade de corrente não usada para injetar potência ativa na rede. A eficácia da estratégia proposta é validada através resultados experimentais e de simulação usando um inversor multifuncional conectado à rede e a uma carga local não-linear com característica capacitiva.

Palavras-chave— Compensação Multiobjetivos, Conversores Multifuncionais, Fontes de Energia Renovável, Qualidade da Energia Elétrica.

1 Introdução

Atualmente os conversores eletrônicos de potência (CEP), originalmente usados como interface entre a rede e a fonte renovável de energia, vêm sendo usados para realizar funções auxiliares, tais como regulação de tensão e compensação de reativos e harmônicos, com o objetivo de melhorar o fator de potência no ponto de acoplamento comum (PAC) ou reduzir as perdas ao longo de uma microrrede de energia. Tais objetivos podem ser alcançados a partir de uma adequada estratégia de controle (Monteiro, 2009), (Carnieletto, 2009), (Pinto, 2007) e (Barbosa, 1998) do CEP.

A fonte local de energia (FLE) pode ser um arranjo de painéis fotovoltaicos ou uma turbina eólica, por exemplo. Entretanto, a produção de energia não é constante, podendo sofrer grandes variações ao longo do dia (Hasanzadeh, 2010). Além disso, a carga local também pode apresentar variações (Curtri, 2003). O uso do CEP para executar funções auxiliares é limitado, principalmente, pela capacidade remanescente do conversor, definida como o montante da potência nominal do CEP que não é usado para injetar energia na rede. No caso dos painéis fotovoltaicos, a capacidade remanescente do CEP aumenta quando a geração diminui. Esta situação pode ocorrer devido ao sombreamento dos

módulos ou mesmo durante a noite, quando toda a capacidade do CEP pode ser usada para compensar distúrbios associados com a qualidade da energia elétrica (QEE).

Em geral, um CEP convencional, usado apenas para injetar energia na rede pode ser convertido em um CEP multifuncional agregando-se a realimentação da corrente da carga local e modificando o sistema de controle. Entretanto, os CEPs são originalmente dimensionados para processar o pico da potência ativa que pode ser produzida pela FLE. É comum fazer a injeção de potência ativa usando forma de onda senoidal para a corrente. Logo, a capacidade (potência) do CEP é associada à corrente de pico que pode circular pelas chaves do conversor.

Alguns trabalhos que exploraram o uso multifuncional dos CEPs injetando potência ativa e compensando todos os distúrbios da carga, tais como em (Machado, 2004), (Almeida, 2013) e (Moreno, 2009) ou compensando seletivamente estes distúrbios como em (Brandão, 2013) e (Bonaldo, 2014), não indicam a necessidade de realizar a limitação da compensação de acordo com a capacidade remanescente do CEP, pois consideram que o conversor tem capacidade suficiente para realizar a injeção de potência ativa simultaneamente à compensação.

Em (Bonaldo, 2015a) foi proposta uma estratégia de compensação parcial de harmônicas e reativos baseada no monitoramento da potência aparente (VA) disponível no CEP. Esta estratégia mantém o CEP operando dentro de sua capacidade nominal de potência. No entanto, dependendo do tipo de distúrbio compensado e das características da carga local, a corrente sintetizada ainda pode apresentar amplitude maior que a corrente máxima suportável pelo CEP.

Portanto, é natural pensar que a corrente injetada pelo CEP multifuncional deve ser limitada em um determinado valor, o qual pode ser definido, por exemplo, como o pico da corrente nominal. Assim, a compensação total dos distúrbios e, por consequência, a obtenção de fator de potência unitário para a unidade consumidora ocorreria apenas no caso em que o CEP tivesse capacidade de sintetizar uma corrente com amplitude suficiente para acomodar a corrente relacionada à energia produzida pela FLE e a corrente de compensação de distúrbios.

Neste artigo é explorado o caso crítico em que a corrente necessária para obter o fator de potência unitário é superior à capacidade do CEP. Assim, a referência de corrente relacionada à compensação de distúrbios é limitada, gerando uma compensação parcial dos parâmetros de qualidade de energia (QEE).

Este artigo é particularmente interessante se for considerado o ponto de vista da operação do CEP visando a compensação multiobjectivos, visto que, qualquer que seja o objetivo final da compensação, o CEP dará prioridade à injeção da energia gerada pela FLE e fará automaticamente a limitação da referência de corrente de compensação.

Desta forma, garante-se que o CEP buscará compensar as harmônicas e os reativos independentemente da ação de configuração externa ou malhas de controle secundárias, pois o nível de compensação de distúrbios é automaticamente ajustado de acordo com a capacidade de corrente não usada para a tarefa de injeção de potência ativa. Assim, torna-se possível usar o potencial do CEP multifuncional de forma efetiva, evitando eventuais desconexões devidas à sobrecarga. O desenvolvimento da técnica de controle e geração dos sinais de referência juntamente com resultados experimentais e de simulação são discutidos nas próximas seções.

2 Modelagem do conversor multifuncional

A Figura 1 mostra um CEP multifuncional monofásico conectado à rede, cujos parâmetros são mostrados na Tabela 1. A Figura 2 mostra o diagrama de blocos do sistema de controle multifuncional do conversor. Com a chave seletora na posição 1, o CEP opera de forma tradicional, ou seja, sem qualquer limitação no sinal de referência. Quando na posição k , a chave seleciona a estratégia proposta para ajuste automático da amplitude do sinal para compensação de distúrbios, visando realizar a limitação da corrente processada pelo CEP.

Tabela 1. Parâmetros do Sistema

$L_1 = 0,5 \text{ mH};$	$C_L = 100 \text{ }\mu\text{F}$
$L_2 = 0,5 \text{ mH};$	$R_L = 95 \text{ }\Omega$
$C_o = 3 \text{ }\mu\text{F};$	$L_L = 60 \text{ mH}$
$C_{CC} = 1 \text{ mF}; V_{CC} = 300 \text{ V};$	$L_g = 0,5 \text{ mH}; R_g = 0,1 \text{ }\Omega;$
Rede: $127 \text{ V} / 60 \text{ Hz}$	$T_s = 38 \text{ }\mu\text{s}$
$K_c = 0,95$	$K_{IPR} = 100$
$\omega_{cPR} = 5 \text{ [rad/s]}$	$\omega_o = 377 \text{ [rad/s]}$
$K_p = 2,2$	$K_I = 49$

O sistema de controle do CEP é composto por duas malhas de controle. A primeira é uma malha rápida para controlar a corrente de saída do CEP (i_F) e a outra malha é mais lenta, responsável por manter constante a tensão no barramento CC.

Uma malha adicional é inserida para controlar a corrente no indutor do conversor CC-CC do tipo *boost* que realiza a conexão da fonte local de energia ao barramento CC do inversor. Por simplicidade, a modelagem e o projeto do respectivo controlador do conversor *boost* são omitidos, uma vez que não exercem influência direta na estratégia de limitação da capacidade do CEP proposta neste trabalho.

O controlador da corrente de saída, $G_C(s)$, é do tipo proporcional-ressonante (Gabe, 2009), (Hasanzadeh, 2010), dado por:

$$G_C(s) = K_C + \sum_{h=1,3,5,\dots,15} \frac{2K_{IPR}\omega_{cPR}^s}{s^2 + 2\omega_{cPR}s + (h\omega_o)^2} \cdot \quad (1)$$

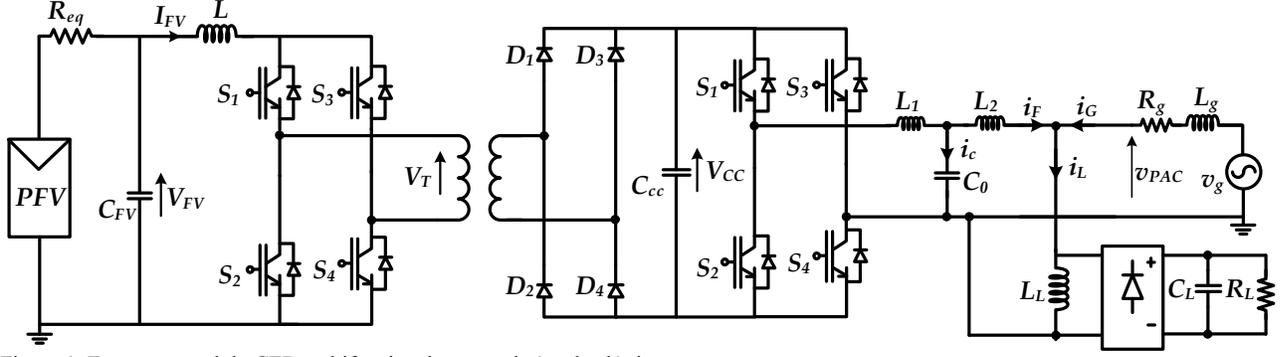


Figura 1. Esquema geral do CEP multifuncional conectado à rede elétrica.

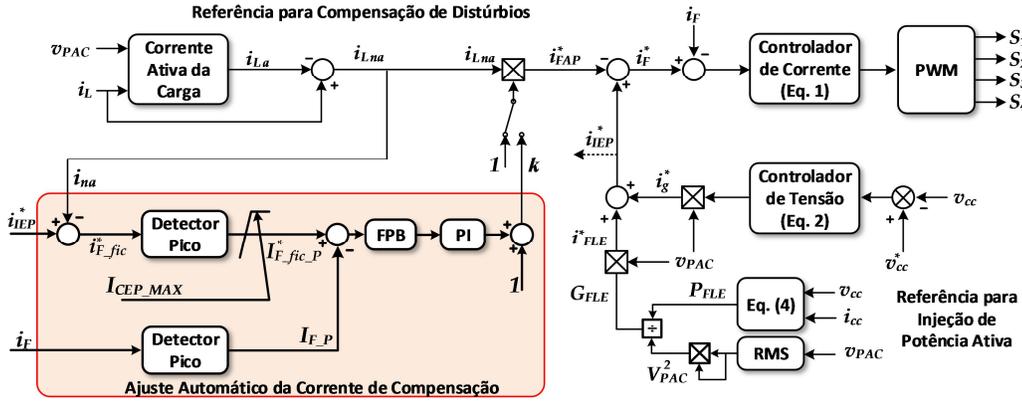


Figura 2. Sistema geral de controle do CEP multifuncional com ajuste automático do sinal de referência para compensação.

A ordem harmônica a ser compensada é representada por h , ω_0 é a frequência fundamental da rede e K_C , $K_{I_{PR}}$ e ω_{CPR} representam o ganho proporcional, o ganho integral e a banda passante do controlador ressonante, respectivamente.

O controle do barramento CC é responsável por manter o balanço entre a potência que é entregue ao sistema na saída do conversor e a potência no barramento CC. Conforme (Moreno, 2009), o compensador $PI_{CC}(s)$ que produz a corrente de referência para o conversor, é dado por:

$$PI_{CC}(S) = K_P + \frac{K_I}{S}. \quad (2)$$

Este controlador proporciona uma banda passante suficientemente estreita, evitando oscilações no valor da referência e minimizando a interação com o controlador rápido da malha de corrente (Mattavelli, 2006). A banda passante da malha de controle da tensão foi ajustada em 7 Hz, e a margem de fase em 70° . O período de amostragem considerado é $T_s = 38 \mu s$. Os principais parâmetros do sistema de controle são mostrados na Tabela 1.

3 Estratégia de geração dos sinais de referência

A geração dos sinais de referência para o CEP multifuncional consiste de duas partes principais.

3.1 Referência para injeção da energia produzida pela FLE

O sinal de referência para injeção da energia gerada pela FLE (i_{FLE}^*) é gerada utilizando a estratégia de síntese de corrente senoidal. Segundo esta estratégia, a forma da onda da corrente injetada deve corresponder à componente fundamental da tensão do PAC (v_{PAC_1}). Conforme discutido em (Marafião, 2015) esta estratégia garante um menor nível de distorção na corrente além de não contribuir para amplificar harmônicas devidas a eventuais ressonâncias que ocorram na rede elétrica. Desta forma, a referência de corrente i_{FLE}^* é determinada segundo:

$$i_{FLE}^* = \frac{P_{FLE}}{V_{PAC_1}^2} v_{PAC_1} = G_{FLE} v_{PAC_1}, \quad (3)$$

onde G_{FLE} representa a condutância equivalente do CEP e P_{FLE} representa a potência líquida gerada pela FLE, a qual deve ser injetada na rede elétrica:

$$P_{FLE} = \frac{1}{T} \int_0^T v_{cc}(t) i_{cc}(t) dt. \quad (4)$$

A componente fundamental da tensão no ponto de acoplamento do CEP (v_{PAC_1}) pode ser obtida pelo uso de um *Phase Locked Loop* (PLL) ou através da aplicação de um filtro do tipo passa-faixa com largura de banda estreita e sintonizado na frequência da rede. Considerando que a variação da frequência da rede é relativamente pequena,

optou-se pela utilização do filtro passa-faixa para obter v_{PAC_1} , seguido pelo cálculo do valor RMS (V_{PAC_1}).

3.2 Referência para manter a tensão do Barramento CC regulada

O sinal de referência i_g^* é usado para manter a tensão do barramento CC regulada no valor desejado. Conforme se observa na Figura 2, a forma de onda de i_g^* é a mesma forma de onda da tensão do PAC, isto é, esta referência de corrente segue o princípio da Síntese de Carga Resistiva (SCR) que contribui para o amortecimento de oscilações do sistema. Assim, i_g^* é dada por (5), enquanto i_{G_pico} é a saída do controlador PI do barramento CC que representa o valor de pico da corrente pela rede que garante o balanço de potência ativa entre o conversor e a carga.

$$i_g^* = v_{PAC} i_{G_pico} \quad (5)$$

É interessante ressaltar que esta referência de corrente poderia ser usada para prover também a injeção da energia produzida pela FLE, tornando desnecessária a utilização do sinal de referência i_{FLE} . Entretanto, optou-se por separar o sinal de referência para regular a tensão CC do sinal de referência de injeção de energia para evitar instabilidade devida a inversão de fase das harmônicas que ocorre quando a potência ativa gerada pela FLE é maior que a potência ativa demanda pela carga local (Bonaldo, 2015b).

3.3 Referência para compensação de distúrbios

Segundo diversas teorias de potência, tais como (Depenbrock, 1993), (Czarnecki, 1987) e (Tenti, 2011), o fator de potência visto pela rede é unitário somente se as formas de onda da corrente e da tensão forem idênticas e em fase. Condição que pode ser alcançada fazendo com que a carga tenha um comportamento resistivo.

A conexão de uma carga local com características não-ideais no ponto de acoplamento do CEP causa a circulação de correntes harmônicas, correntes relacionadas à potência reativa, ou ambas. A soma destas componentes de corrente, denominada de corrente não-ativa (i_{Lna}), faz com que a forma de onda da corrente pela rede seja diferente da tensão. Portanto, a corrente não-ativa, que não está relacionada ao fluxo de potência ativa para a carga, deve ser compensada para garantir um elevado fator de potência do ponto de vista da rede.

A componente de corrente (i_{Lna}) que corresponde ao fluxo de potência ativa (P_L) para a carga é calculada conforme:

$$i_{Lna} = G_a \cdot v_{PAC} = \frac{P}{V_{PAC}^2} \cdot v_{PAC}, \quad (6)$$

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T v_{PAC}(t) i_L(t) dt, \quad (7)$$

$$V_{PAC} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [v_{PAC}(t)]^2 dt}. \quad (8)$$

onde G_a corresponde à condutância equivalente da carga local.

A partir da corrente ativa da carga, pode-se calcular a parcela de corrente não-ativa:

$$i_{Lna} = i_L - i_{La}. \quad (9)$$

Portanto, a referência de corrente para compensação de distúrbios é obtida conforme (10).

$$i_{FAP}^* = i_{Lna} \quad (10)$$

3.4 Referência de corrente para o CEP

Considerando os sinais de referência mostrados acima (3), (5) e (10), o sinal de referência que efetivamente deve ser sintetizada pelo CEP é dada por:

$$i_F^* = i_g^* + i_{FLE}^* - i_{FAP}^*. \quad (11)$$

Se o CEP fosse operado apenas como uma interface eletrônica de potência (IEP), isto é, sem realizar a compensação da corrente da carga, a referência de compensação i_{FAP}^* seria nula e o CEP apenas injetaria na rede a energia gerada pela FLE. Por isso, a composição de i_g^* com i_{FLE}^* recebe a seguinte notação:

$$i_{IEP}^* = i_g^* + i_{FLE}^*, \quad (12)$$

de forma que (11) pode ser reescrita como (13).

$$i_F^* = i_{IEP}^* - i_{FAP}^*. \quad (13)$$

Dada a referência de corrente para o CEP (13), conclui-se que, para compensar completamente os distúrbios gerados pela conexão da carga não-linear ao PAC, basta atribuir a corrente não-ativa ao sinal de referência para compensação, tal como (10) e conforme mostrado na Figura 2. Neste caso, com a chave seletora na posição 1, o CEP opera como um conversor multifuncional padrão, isto é, injetando energia produzida pela FLE e compensando plenamente os distúrbios de QEE.

Entretanto, a compensação pode não ser possível se a amplitude da corrente total que deve ser sintetizada pelo CEP ($i_{F,P}$) for maior que a máxima corrente para a qual o CEP foi projetado (I_{CEP_MAX}). A próxima seção apresenta uma estratégia para tratar esta questão.

4 Ajuste da amplitude da corrente de compensação

Tendo em vista que o CEP é usado primariamente como uma interface entre a FLE e a rede, aplica-se a seguinte ordem de prioridades na operação:

- 1) Injeção da energia produzida pela FLE;
- 2) Compensação de distúrbios de QEE;

Portanto, a estratégia de limitação da corrente de saída do CEP não deve penalizar a parcela de corrente para injeção de potência ativa na rede, mas sim a parcela relacionada à compensação de distúrbios.

O fator de ponderação (k) do sinal para compensação é calculado com base na amplitude da corrente $i_{F,P}$ medida na saída do inversor e na capacidade de corrente do conversor, isto é, na corrente de pico que pode ser processada pelo conversor (I_{CEP_MAX}).

O ajuste do fator k se dá através da ação proporcional integral do controlador do nível de compensação, como mostrado na Figura 2. O controlador gera o valor de k a

partir do erro obtido da comparação entre $I_{F_fic_P}$ e I_{F_P} , onde:

- $I_{F_fic_P} \rightarrow$ valor de pico da corrente fictícia que circularia pelo CEP caso fosse realizada a compensação total dos distúrbios;
- $I_{F_P} \rightarrow$ valor de pico da corrente efetivamente sintetizada pelo CEP (valor medido na saída do inversor);
- $I_{CEP_MAX} \rightarrow$ valor nominal da corrente de pico do CEP (máximo valor de corrente que pode ser sintetizado);

A operação do sistema de ajuste automático da amplitude da corrente de compensação pode ser explicada através da análise de dois casos distintos apresentados a seguir.

Caso 1: $I_{F_fic_P} > I_{CEP_MAX}$:

Este caso ocorre quando $I_{F_fic_P}$ excede a capacidade de corrente do CEP. Então a corrente fictícia de pico é saturada em I_{CEP_MAX} , isto é, limitada no máximo valor que pode efetivamente ser sintetizado pelo conversor. Assim, através do controlador PI é possível ajustar o valor de k para forçar que o pico de corrente de i_F seja igual à I_{CEP_MAX} . Neste caso ocorre a compensação parcial dos distúrbios da carga, pois a amplitude do sinal de referência e, por consequência, a amplitude da corrente de compensação, é reduzida. Assim, o sinal de referência para compensação de distúrbios é então dada por (14):

$$i_{FAP}^* = k \cdot i_{na}; \quad 0 \leq k < 1 \quad (14)$$

Caso 2: $I_{F_fic_P} \leq I_{CEP_MAX}$:

Por outro lado, caso o pico da corrente fictícia ($I_{F_fic_P}$) seja menor que o limite de corrente do conversor, não ocorre a ação de saturação. Desta forma, o CEP é controlado para que $I_{F_fic_P}$ iguale o valor de I_{F_P} . Logo, a saída do controlador PI se torna nula e o fator k converge para a unidade. Desta forma ocorre a compensação total da corrente não-ativa relacionada aos distúrbios causados pela carga local, conforme (15).

$$i_{FAP}^* = k \cdot i_{Lna}; \quad k = 1 \quad (15)$$

O detector de pico é realizado digitalmente no processador de sinais e consiste em comparar cada uma das amostras do sinal de entrada, em cada semiciclo da rede, e armazenar o maior valor detectado. A sincronização é realizada por meio da detecção da passagem por zero da componente fundamental da tensão do PAC. Desta forma, o detector de pico pode ser modelado, conforme (16), por um segurador de ordem zero, cujo atraso é equivalente a meio período da rede ($T_1/2$), o qual pode ser simplificado usando a aproximação de Padé de primeira ordem (Mattavelli, 2006).

$$H_{DP}(s) = \frac{1 - e^{(s \frac{T_1}{2})}}{s} \approx \frac{\frac{T_1}{2}}{1 + s \frac{T_1}{4}} \quad (16)$$

O controlador PI que ajusta o valor de k é modelado de acordo com (17).

$$PI_k(s) = K_{Pk} + \frac{K_{Ik}}{s} \quad (17)$$

Filtros com característica passa-baixas são usados para suavizar eventuais saltos nos valores de pico detectados e são modelados por (18), sendo que ω_c representa a frequência de corte do filtro.

$$H_{PB}(s) = \frac{\omega_c}{s + \omega_c} \quad (18)$$

A malha de controle que ajusta o valor do coeficiente de ponderação (k) do sinal de referência para a corrente de compensação é mostrada na Figura 3. De acordo com (Mattavelli, 2006), considerando que a referência de corrente seja normalizada, o ganho estático da malha de controle da corrente do CEP pode ser modelado simplesmente como o inverso do ganho do circuito de aquisição de corrente ($1/K_S$). A saturação de $I_{F_fic_P}$ não foi considerada no diagrama de blocos da Figura 3, pois este representa um sistema linear. A função de transferência de laço aberto da malha de ajuste do fator de ponderação (k) é dada por:

$$H_{LA}(s) = H_{PB}(s)H_{PD}(s)PI_k(s) \frac{1}{K_S} \quad (19)$$

A função de transferência de laço aberto é reescrita em (20) através da substituição de (16), (17) e (18) em (19).

$$H_{LA}(s) = \frac{\omega_c}{s + \omega_c} \cdot \frac{\frac{T_1}{2}}{1 + s \frac{T_1}{4}} \cdot \frac{1}{K_S} \cdot \left(K_{Pk} + \frac{K_{Ik}}{s} \right) \quad (20)$$

O sistema foi ajustado, através das equações (21) e (22), para apresentar margem de fase (MF) de 85° e largura de banda em malha fechada (ω_{mf}) de aproximadamente 6 Hz. Estes parâmetros garantem o amortecimento do sistema, evitando oscilações indesejadas que podem causar sobrecorrentes. Considerando estas restrições, os ganhos do controlador foram projetados para $K_{Pk} = 2$ e $K_{Ik} = 130$.

$$\frac{K_{Ik}}{K_{Pk}} = \frac{\omega}{tg \left[tg^{-1} \left(\frac{\omega}{\omega_c} \right) + tg^{-1} \left(\omega \frac{T_1}{4} \right) - \frac{\pi}{2} + MF \right]} \quad (21)$$

$$K_{Pk} = \frac{2K_S}{\omega_c T_1} \frac{\sqrt{\left(\omega^2 + \omega^2 \omega_c \frac{T_1}{4} \right)^2 + \left(\omega_c \omega - \omega^3 \frac{T_1}{4} \right)^2}}{\sqrt{\omega^2 + \left(\frac{K_{Ik}}{K_{Pk}} \right)^2}} \quad (22)$$

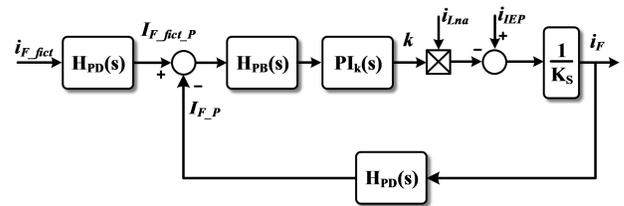


Figura 3. Malha de controle do fator de ponderação k .

5 Resultados

As simulações e os resultados experimentais apresentados nesta seção têm por objetivo mostrar que a corrente processada pelo CEP multifuncional não excede o limite estabelecido, mesmo quando o CEP atua provendo serviços auxiliares.

5.1 Resultados de Simulação

A simulação da estratégia de controle com limitação da corrente sintetizada pelo CEP é baseada no sistema mostrado na Figura 1 e na Figura 2, o qual é caracterizado pelos dados da Tabela 1. Nesta simulação, a capacidade nominal de potência do CEP é de 1000 Wp. Considerando que a tensão nominal da rede é 127 V / 60 Hz, o CEP tem capacidade de injetar uma corrente eficaz de aproximadamente 8 A. É interessante ressaltar que o termo eficaz foi usado ao invés de RMS devido ao fato de que os CEPs, em geral, são projetados para injetar na rede uma corrente com forma de onda senoidal. Desta forma, a máxima corrente que o CEP é capaz de sintetizar é $I_{CEP_MAX} = 11$ A de pico.

Apesar do CEP ser capaz de injetar 1000 W na rede, a simulação é realizada considerando que a fonte renovável está gerando 800 W de potência. Esta hipótese é razoável, visto que, em geral, os sistemas de aproveitamento de energia fotovoltaica são dimensionados para a máxima potência que pode ser gerada pelos painéis. Em quaisquer situações que fujam das condições ideais, a potência gerada será menor que a capacidade nominal do arranjo fotovoltaico.

Da Figura 4, observa-se que até o instante $t = 1$ s a simulação é conduzida com o CEP apenas injetando na rede os 800 W gerados pela FLE. Logo, uma corrente praticamente senoidal com pico de 8,9 A é produzida pelo CEP e injetada na rede, que supre as correntes harmônica e reativa demandadas pela carga. Assim, o fator de potência medido na rede é $\lambda = 0,56$.

A partir de $t = 1$ s é iniciada a operação multifuncional, isto é, a função de compensação de harmônicas e reativos é habilitada, resultando em um fator de potência praticamente unitário na rede ($\lambda \approx 1$). Nota-se que a corrente (i_F) necessária para realizar a injeção de potência ativa e a compensação total dos distúrbios da carga apresenta um pico de 14 A, violando o limite de corrente (11 A) estabelecido para o CEP.

Em $t = 1,3$ s o sistema de limitação da corrente é acionado. A resposta transitória da corrente de pico do CEP (i_{FP}) é mostrada na Figura 5. Passado o transitório inicial, a amplitude da corrente produzida pelo CEP estabiliza em $i_{FP} = I_{CEP_MAX} = 11$ A. Como o sistema de limitação da corrente do CEP é baseado em diminuir o nível de compensação de distúrbios e manter inalterada a injeção de corrente oriunda da FLE, ocorre uma degradação no fator de potência medido na rede, pois a rede fornece parte da corrente reativa e da corrente harmônica demandada pela carga. Assim, o fator de potência varia de $\lambda = 1$ para $\lambda = 0,9$. É importante ressaltar que a limitação da corrente de compensação pode afetar o fator de potência de forma distinta, dependendo da forma de onda da corrente da carga local. É interessante ressaltar que a forma de onda da corrente processada pelo CEP (i_F) não é alterada, mas apenas a sua amplitude sofre alteração.

5.2 Resultados Experimentais

Assim como o sistema usado nas simulações, o protótipo usado para obtenção dos resultados experimentais foi implementado conforme a Figura 1, considerando os parâmetros da Tabela 1. Os algoritmos de controle e geração

dos sinais de referência, bem como a estratégia de limitação da capacidade do CEP expostos na Figura 2 foram implementados em um DSP TMS320F28335. O hardware de potência é composto por um inversor monofásico e uma fonte de corrente CC, a qual é baseada em topologia *boost* (conversor CC-CC) com controle em corrente. Tanto o inversor quanto o conversor *boost* são implementados usando IGBTs Semikron SKM50GB, os quais são chaveados a uma frequência de 13 kHz.

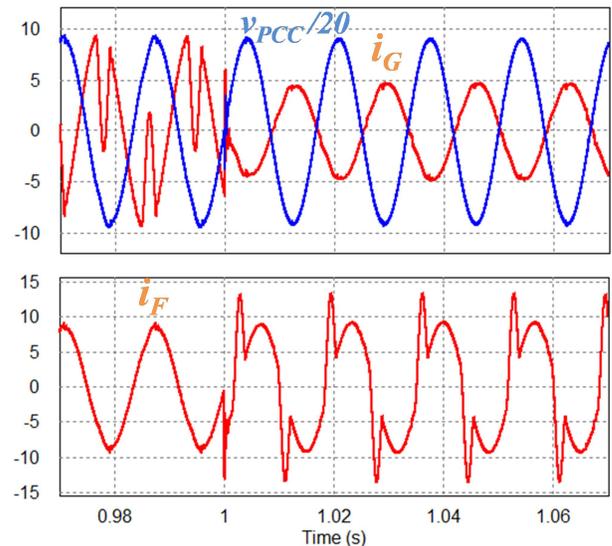


Figura 4. CEP passando de operação convencional para operação multifuncional realizando a compensação total de distúrbios.

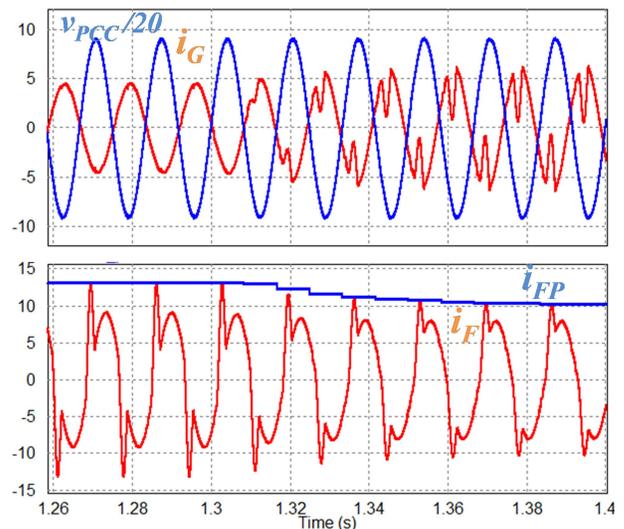


Figura 5. Transitório no instante do acionamento da estratégia de limitação da corrente de compensação.

Neste teste, o CEP opera de forma multifuncional injetando potência ativa na rede e compensando distúrbios. A Figura 6 mostra a dinâmica da corrente pelo CEP (i_F) e do fator de potência na rede (λ) devido à utilização da estratégia de limitação da corrente. Antes da limitação de corrente ser

acionada, o pico da corrente pelo CEP era de 14 A, sendo que o CEP operava de forma multifuncional, injetando potência ativa na rede e realizando a compensação total dos distúrbios, resultando em fator de potência unitário no lado da rede ($\lambda = 1$).

Com a limitação da corrente do CEP ativada, o pico da corrente pelo CEP é reduzido para o máximo valor admitido, que neste caso foi escolhido como $I_{CEP_MAX} = 11$ A. A limitação leva à compensação parcial dos distúrbios, causando a deterioração no valor do fator de potência. Entretanto, é interessante salientar que, mesmo com a limitação de corrente habilitada, o fator de potência resultante no lado da rede ($\lambda = 0,65$) é melhor que o fator de potência que seria obtido se o CEP fosse usado apenas para injetar potência ativa na rede ($\lambda = 0,4$). Detalhes da forma de onda da corrente pelo CEP (i_F) e do fator de potência antes e após a atuação do sistema de limitação são mostrados na Figura 7.

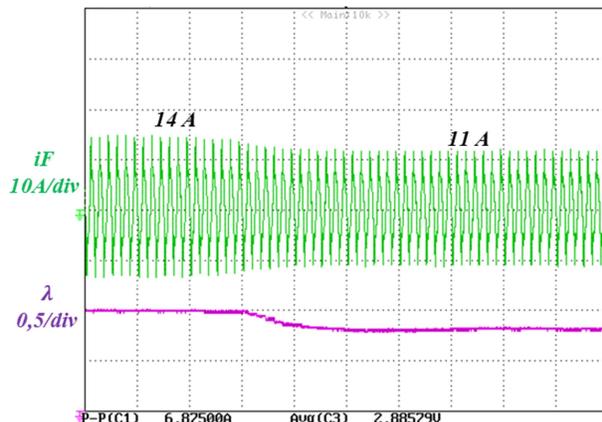


Figura 6. Resultado experimental da resposta dinâmica da estratégia de limitação da corrente de compensação com limite de corrente ajustado para 11 A.

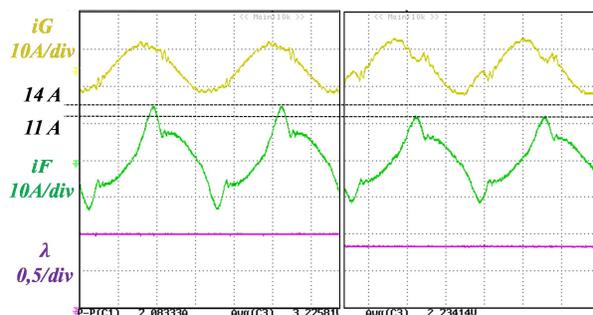


Figura 7. Detalhe das formas de onda da resposta dinâmica do algoritmo de limitação da corrente antes e depois da limitação em 11 A.

6 Conclusão

Este artigo propôs uma estratégia de limitação automática da corrente processada por CEPs multifuncionais. A estratégia de limitação permitiu que a capacidade de corrente disponível no CEP, isto é, não usada para injetar a energia

gerada pela FLE, fosse usada para compensar parte dos distúrbios causados por uma carga local conectada ao PAC.

Conforme demonstrado com resultados experimentais e de simulações, mesmo quando a capacidade remanescente do CEP é insuficiente para produzir fator de potência unitário na rede, a QEE medida no PAC melhora. Isto se deve ao fato de que o CEP fornece parte da corrente relacionada aos distúrbios da carga e, portanto, uma fração destes distúrbios deixa de circular pela rede.

Os casos analisados neste trabalho consideraram que os objetivos da compensação eram reduzir correntes harmônicas e correntes reativas, bem como aumentar o fator de potência no PAC. Entretanto, se objetivos diversos dos citados forem perseguidos, a estratégia proposta mantém-se funcional, uma vez que apenas a corrente gerada para a compensação é limitada pelo algoritmo.

Com a aplicação do sistema de ajuste automático da corrente de compensação, o CEP multifuncional fica protegido contra sobrecargas e malhas externas de ajuste dos sinais de referência, como por exemplo, do nível de compensação que deve ser implementado, tornam-se dispensáveis.

Agradecimentos

Este trabalho foi financiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP (processos 2016/08645-9 e 2017/22629-9) e pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq (processos 302257/2015-2 e 424853/2016-7).

Referências Bibliográficas

- Almeida, P. M.; Barbosa, P. G.; Ferreira, A. A.; Braga, H. A. C. and Ribeiro, P. F. (2013) “Controle E Redução Das Correntes Harmônicas de um Sistema De Geração Fotovoltaico Interligado à Rede Elétrica Sem Filtros Passivos”, *Eletrônica de Potência*, vol. 18, no. 4, pp. 1149-1160, Novembro 2013.
- Barbosa, P. G.; Rolim, L. G. B.; Watanabe, E.; H. Hanitsch, R. (1998) “Control strategy for grid-connected DC-AC converters with load power factor correction”, *IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib.*, vol. 145, no. 5, pp. 487-491, Setembro 1998.
- Bonaldo, J. P.; Paredes, H. K. M. and Pomilio, J. A. (2014) “Controle Flexível Para Conversores Monofásicos Conectados A Sistemas Elétricos Distorcidos De Baixa Tensão”, *Eletrônica de Potência*, vol.19, no. 4, pp.354-367, Setembro 2014.
- Bonaldo, J. P.; Paredes, H. K. M. and Pomilio, J. A. (2015a) “Estratégia de Saturação Dinâmica da Capacidade de Conversores Multifuncionais Conectados à Rede Elétrica”, *Eletrônica de Potência*, vol. 20, no. 4, pp.354-363, Novembro 2015.
- Bonaldo, J. P. (2015b) “Multifuncionalidade De Conversores Eletrônicos De Potência Utilizados Em Microrredes Inteligentes”, Tese de Doutorado, UNICAMP.

- Brandão, D. I.; Marafão, F. P.; Gonçalves, F. A. S.; Villalva, M. G. and Gazoli, J. R. (2013) "Estratégia De Controle Multifuncional Para Sistemas Fotovoltaicos De Geração De Energia Elétrica", *Eletrônica de Potência*, vol. 18, no. 4, pp. 1206-1214, Novembro 2013.
- Carnieletto, R.; Suryanarayanan, S.; Simoes, M.G. and Farret, F.A. (2009) "A Multifunctional Single-Phase Voltage Source Inverter in Perspective of the Smart Grid Initiative", in Proc. of IEEE IAS, pp. 1-7.
- Curri, R. and Matakas, L. (2003) "Reference currents determination techniques for load unbalance compensation", in Proc. of COBEP, pp. 864-869, 2003.
- Czarnecki, L. S. (1987) "What is wrong with the Budeanu concept of reactive and distortion powers and why it should be abandoned", *IEEE Trans. on Instr. Measur.*, vol. IM-36, no. 3, pp. 834-837.
- Depenbrock, M. (1993) "The FDB-method, a generalized applicable tool for analyzing power relations", *IEEE Trans. On Power Delivery*, vol. 8, no. 2, pp. 381-387.
- Gabe, I. J.; Montagner, V. F. and Pinheiro, H. (2009) "Design and implementation of a robust current controller for VSI connected to the grid through an LCL filter," *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 24, no. 6, pp. 1444-1452, Junho 2009.
- Hasanzadeh, A.; Onar, O. C.; Mokhtari, H.; Khaligh, A. (2010) "A Proportional-Resonant Controller-Based Wireless Control Strategy With a Reduced Number of Sensors for Parallel-Operated UPSs," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 25, no. 1, pp. 468-478, Janeiro 2010.
- Machado, R. Q.; Buso, S.; Pomilio, J. A. and Marafao, F. P. (2004) "Three-phase to single-phase direct connection rural cogeneration systems", in Proc. of IEEE APEC, vol.3, pp. 1547-1553, 2004.
- Marafão, F. P.; Brandão, D. I.; Costabeber, A. and Paredes, H. K. M. (2015) "Multi-task control strategy for grid-tied invert-ers based on conservative power theory", *IET Renewable Power Generation*, vol.9, no.2, pp.154,165, March 2015.
- Mattavelli, P and Buso, S., 2006, *Digital Control in Power Electronics*. 1st ed. Morgan & Claypool Publishers.
- Monteiro, L. F. C.; Afonso, J. L.; Pinto, J. G.; Watanabe, E. H.; Aredes, M. and Akagi, H. (2009) "Compensation Algorithms Based On The P-q And Cpc Theories For Switching Compensators In Micro-grids", *Eletrônica de Potência*, vol. 14, no. 14, pp. 259-268, Dezembro 2009.
- Moreno, R. M.; Pomilio, J. A.; Pereira da Silva, L. C.; and Pimentel, S. P. (2009) "Mitigation Of Harmonic Distortion By Power Electronic Interface Connecting Distributed Generation Sources To A Weak Grid", *Eletrônica de Potência*, vol. 14, no. 14, pp. 269-276, Dezembro 2009.
- Pinto, J. P.; Pregitzer, R.; Monteiro, L. F. C. and Afonso, J. L. (2007) "3-phase 4-wire shunt active power filter with renewable energy interface", in Proc. of IEEE ICREPQ, pp. 1-6, 2007.
- Tenti, P.; Paredes, H. K. M. and Mattavelli, P. (2011) "Conservative Power Theory, a Framework to Approach Control and Accountability Issues in Smart Microgrids", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol.26, no.3, pp.664-673, March 2011.