

A Multifuncionalidade do Compensador Série em uma Microrrede CA

Helio M. A. Antunes* Sidelmo M. Silva**
Alysson A. P. Machado***

* Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Espírito Santo, ES, (e-mail: helio.antunes@ufes.br).

** Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, MG, (e-mail: sidelmo@ufmg.br)

*** Departamento de Automação Industrial, Instituto Federal do Espírito Santo, ES, (e-mail: alysson.machado@ifes.edu.br)

Abstract:

In this paper a single-phase multifunctional converter is proposed based on a series compensator for application to AC microgrids with centralized control architecture. In addition to developing the typical functionalities of series compensators, the proposed converter can switch its connection topology from series to parallel and vice-versa, depending on the power grid and microgrid needs. This flexibility allows the converter to operate as: (i) grid-forming, applying voltage reference and managing black-start; (ii) grid supporting, performing ancillary services such as voltage regulation, voltage sag and swell compensation, along with active series filtering; (iii) smooth transition between microgrid operation modes. Simulation results are shown to demonstrate the operation of proposed converter.

Resumo:

Nesse artigo é proposto um conversor multifuncional monofásico baseado em um compensador série e aplicado em uma microrrede CA com arquitetura de controle centralizada. Além de desenvolver as funções típicas do compensador série, o conversor multifuncional pode mudar a sua topologia de conexão com a rede de série para paralelo e vice-versa, dependendo das condições da rede principal e microrrede. Essa flexibilidade de operação permite o conversor operar como: (i) formador de rede, produzindo uma referência de tensão e gerenciando o *black-start*; (ii) suporte à rede provendo serviços ancilares como regulação de tensão, compensador de *sag* e *swell*, função de filtro ativo série; (iii) transição suave entre os modos de operação da microrrede. São apresentados resultados de simulação que demonstram a operação do conversor proposto.

Keywords: Multifunctional converter; series compensator; distributed generation; grid-forming converter; grid-supporting converter; microgrids.

Palavras-chaves: Conversor multifuncional; compensador série; geração distribuída; conversor formador de rede; conversor de suporte à rede; microrredes.

1. INTRODUÇÃO

Na maior parte do mundo, a energia elétrica é comumente produzida em sistemas centralizados, onde se concentram grandes usinas afastadas dos centros consumidores. Nesse modelo centralizado de produção de energia elétrica, os investimentos para transmissão e distribuição são de grande porte (Sharkh et al., 2014).

Na atualidade, a produção de energia mais próxima dos consumidores tem ganhado espaço, colocando em primeiro plano os sistemas de geração descentralizados, com potências da ordem de 1kW a 10 MW (Bhende and Kalam, 2013). Os principais argumentos para essa mudança são econômicos, técnicos e devido às políticas ambientais. Destaca-se, no entanto, que essa mudança tem sido viabilizada pelos contínuos avanços da eletrônica de potência e

o grande uso de fonte renováveis de energia, como fotovoltaica e eólica (Bouzid et al., 2015).

Com a inserção de geração distribuída no sistema elétrico de baixa tensão, surge um novo conceito, denominado de microrrede. Segundo Lasseter (2002) uma microrrede é um conjunto de microfuentes de geração de energia elétrica, cargas elétricas e elementos armazenadores de energia controlados por uma unidade central, podendo operar conectada à rede principal ou no modo ilhado. Deve ser destacado que as microfuentes se baseiam principalmente em fontes que utilizam a energia solar, eólica e biomassa (Li et al., 2015).

Em uma microrrede CA é possível encontrar conversores eletrônicos desempenhando funções distintas, e usualmente são classificados em três categorias: supridor de rede, formador de rede e suporte à rede. O primeiro conversor opera

injetando potência ativa na rede, sendo usualmente controlado como uma fonte de corrente no modo PQ (potência ativa e reativa). Já o segundo opera como uma fonte de tensão controlada no modo V-f (tensão-frequência), suprindo cargas elétricas no modo ilhado (Lopes et al., 2006). E o de suporte à rede tem a função de prover serviços ancilares, em termos da regulação de tensão e frequência, filtragem harmônica e outras funções que podem melhorar a qualidade da energia elétrica (QEE) da microrrede (Azevedo et al., 2013).

É comum em microrredes o uso da arquitetura de controle centralizada do tipo mestre-escravo, em que o seu modo de operação ilhado é garantido pelo conversor formador de rede. Quando a rede elétrica principal está presente, o formador de rede pode operar provendo serviços ancilares, como um conversor de suporte à rede. Já quando a microrrede precisa operar no modo ilhado por falha na rede ou por um ilhamento intencional, o controlador central da microrrede (CCMR) envia um sinal para o conversor formador de rede mudar para o modo fonte de tensão e a chave estática isola a microrrede da rede principal (Parhizi et al., 2015).

Atualmente os conversores multifuncionais fundamentados nos inversores do tipo fonte de tensão (*Voltage Source Inverters*, VSIs) têm chamado muita atenção nas aplicações em microrredes. Isso se deve ao fato de que, com o mesmo inversor aplicado na geração distribuída que opera como supridor de rede, podem ser adicionadas múltiplas funcionalidades de suporte à rede, com respectivas adaptações na estrutura de controle do conversor. Desse modo é possível melhorar a QEE e aumentar a estabilidade do sistema elétrico utilizando um único conversor (Miveh et al., 2015).

Neste artigo, é proposto um conversor multifuncional monofásico fundamentado no compensador série e aplicado em uma microrrede CA com arquitetura de controle centralizada. O conversor proposto também pode ser aplicado em um sistema trifásico a três e quatro fios, por meio da conexão em estrela ou delta dos conversores monofásicos. Além de desenvolver as funções típicas do compensador série, o conversor multifuncional pode mudar a sua topologia de conexão com a rede de série para paralelo e vice-versa, dependendo das condições da rede principal e microrrede. Essa flexibilidade de operação permite o conversor operar como:

- Formador de rede, gerando referências de tensão para o ponto de acoplamento comum e possibilitando o *black-start*. O *black-start* consiste na energização da microrrede sem a presença da rede elétrica principal.
- Suporte à rede, provendo serviços ancilares como regulação de tensão, compensador de afundamentos e elevações momentâneas de tensão, além da função de filtro ativo série.
- Transição suave entre os modos de operação da microrrede.

São apresentados resultados de simulação que demonstram a operação do conversor proposto.

2. O CONVERSOR MULTIFUNCIONAL

O conversor proposto é ilustrado na Figura 1, com destaque para o compensador tradicional e elementos adiciona-

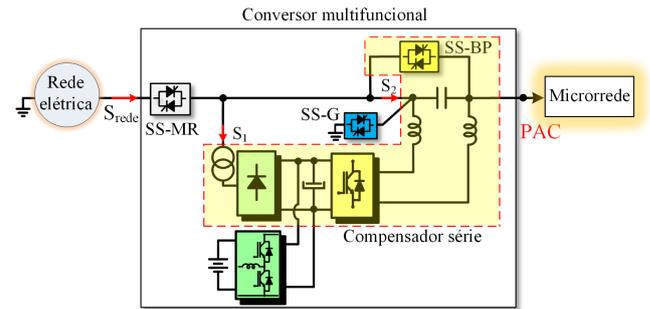


Figura 1. Configuração do conversor multifuncional.

dos na topologia. A ideia da configuração multifuncional é derivada de Han et al. (2013). Já a configuração do conversor é derivada do dispositivo dinâmico de proteção série, porém com um inversor em ponte H (Silva and Filho, 2002). Para habilitar o fluxo bidirecional no conversor é adicionado ao barramento CC do inversor um conversor *buck-boost* e banco de baterias (Silva et al., 2014).

Além da topologia convencional do compensador série, são incluídas duas chaves eletromecânicas (S_1 e S_2) e duas chaves estáticas (SS-MR e SS-G), como ilustrado na Figura 1. A chave estática SS-BP está usualmente presente na topologia dos compensadores série, e tem por finalidade a proteção do conversor para a condição de falta a jusante (Farhadi-Kangarlu et al., 2017). As chaves S_2 , SS-G e SS-BP permitem ao conversor permanecer conectado em série ou paralelo à rede elétrica. Já a chave S_1 permite desconectar o transformador *shunt*, reduzindo desse modo as perdas quando o lado CC do inversor é alimentado pelo banco de baterias. A chave SS-MR permite fazer a transição do modo conectado para ilhado e vice-versa. A chave S_{rede} não faz parte do conversor multifuncional, sendo controlada pela rede principal. Quando a microrrede deve mudar para o modo ilhado, a chave SS-MR é aberta e a chave SS-G conecta o neutro da microrrede e do conversor. Todas as chaves estáticas são compostas por tiristores em anti-paralelo.

Os principais modos de operação e de transição do conversor multifuncional de acordo o diagrama da Figura 2 são:

- Modo I: Neste modo a microrrede está desabilitada.
- Modo II: O conversor multifuncional está desativado e em manutenção, porém o PAC (ponto de acoplamento comum) da microrrede é suprido pela rede elétrica. A chave SS-BP conecta à rede elétrica à microrrede e o retificador alimenta o barramento CC, permitindo o carregamento do banco de baterias.
- Modo III: O conversor é conectado em série com a rede elétrica operando como um conversor de suporte à rede. Nesse modo o conversor opera provendo serviços ancilares típicos de um compensador série, compensando os distúrbios na forma de onda da tensão.
- Modo IV: O conversor opera no modo ilhado como um formador de rede. Nesse modo o conversor pode prover a funcionalidade de *black-start*.
- T_I : Nessa transição a microrrede está ligada e o conversor multifuncional opera em *standby* para, por exemplo, realização de manutenção.

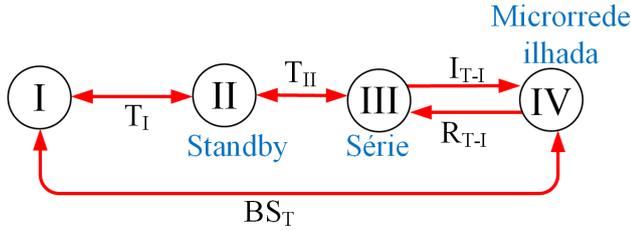


Figura 2. Transições entre os modos de operação do conversor multifuncional.

- T_{II} : Essa transição conecta o conversor multifuncional como um compensador série.
- I_{T-I} : Nesta transição o conversor pode inicialmente estar conectado em série, fazendo o ilhamento da microrrede. O momento exato para fazer a transição I_{T-I} é com a corrente da microrrede passando por zero, o que garante a abertura da chave SS-MR e fechamento de SS-G sem que haja um curto-circuito.
- R_{T-I} : Essa transição reconecta a microrrede à rede elétrica. O processo inicia-se com a sincronização das tensões da microrrede com a rede principal. Na reconexão R_{T-I} , as chaves SS-MR e S_2 são fechadas e SS-G é aberta no instante em que a corrente na microrrede passa por zero, conectando o conversor em série com a rede. Terminada a R_{T-I} o conversor pode se manter no Modo III, ou migrar para o Modo II.
- BS_T : O conversor multifuncional pode operar como formador de rede, realizando o *black-start*. Inicialmente a operação ocorre no Modo I, e então, o conversor multifuncional é ligado e passa a energizar o PAC da microrrede no Modo IV. Se for necessário reconectar a microrrede na rede principal, o conversor pode mudar sua operação para o Modo III usando a transição de reconexão R_{T-I} .

3. PROJETO E CONTROLE DO CONVERSOR PROPOSTO

Um ponto fundamental para o conversor multifuncional é a escolha da topologia do inversor e filtro de saída que permitam uma operação série ou paralela, dependendo dos requisitos da microrrede. Desse modo, o VSI monofásico em ponte H sem transformador de baixa frequência (*transformerless*) associado a um sistema de armazenamento de energia é escolhido (Teke and Latran, 2014).

3.1 Projeto do Filtro LC

O filtro de saída dos VSIs são utilizados para reduzir o ripple do chaveamento PWM, além de propiciar o acoplamento com a rede elétrica e conversor. Usualmente os VSIs controlados em tensão utilizam filtro LC, em que a corrente no indutor e tensão do capacitor são controladas (Rocabert et al., 2012). Nos inversores que operam como fonte de tensão controlada, a corrente no ramo capacitivo é limitada entre 10% e 15% da capacidade nominal do VSI (Silva and Filho, 2002).

Para o conversor multifuncional é adotado um projeto do filtro LC fundamentado na operação como fonte de tensão controlada. A capacitância do filtro é adotada para prover uma potência reativa da ordem de 10% (k) da potência

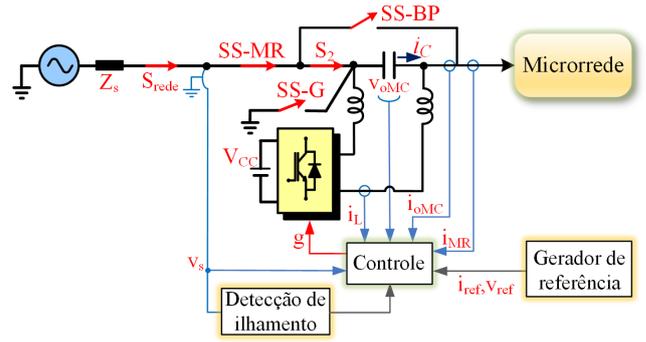


Figura 3. Diagrama de conexão e sensores para controle do conversor multifuncional.

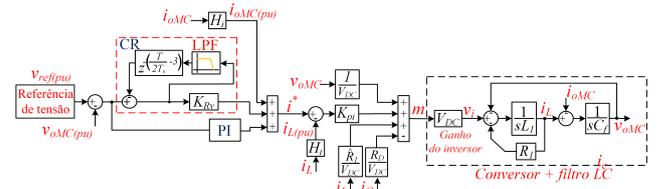


Figura 4. Malha de controle para operação como uma fonte de tensão controlada.

nominal do conversor monofásico (S_n) conforme (1). Para o cálculo da indutância, é adotada uma frequência de corte do filtro LC, usando uma separação de uma década da frequência de chaveamento conforme (2) (Silva and Filho, 2002). A indutância do filtro é dividida em duas partes para reduzir a circulação de correntes de modo comum.

$$C = \frac{kS_n}{2\pi fV_f^2} \quad (1)$$

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2)$$

onde:

- S_n - potência do VSI monofásico [kVA];
- V_f - tensão de fase [V];
- k - percentual de reativos do filtro LC;
- f_c - frequência de corte [Hz];

3.2 Controle do Conversor Multifuncional

O controle do conversor multifuncional deve garantir a operação da microrrede, bem como prover uma transição suave entre os seus modos de operação. A Figura 3 mostra um diagrama por fase com todas as grandezas elétricas medidas para o controle do conversor. Já na Figura 4 é ilustrada a estrutura de controle implementada em coordenadas naturais (abc) e que permite a operação do conversor como fonte de tensão controlada.

O esquema de controle é composto pela associação paralela do controle repetitivo (CR) para harmônicas ímpares e do controlador PI (proporcional-integral) para a malha de tensão, em cascata com um controlador proporcional para a malha de corrente (Zhou et al., 2006). O controlador PI melhora a resposta transitória, já que o CR precisa de, no mínimo, meio ciclo para o início de sua atuação.

Também são utilizadas algumas ações de *feedforward* que incluem realimentação da tensão de saída (v_{oMC}), corrente de saída (i_{oMC}) e cancelamento da resistência equivalente da indutância do filtro LC (\hat{R}_{1L}) (Silva, 2012). Destaca-se também a utilização de uma técnica de amortecimento ativa, a qual provê o amortecimento para a corrente do ramo capacitivo através da inserção de uma resistência eletrônica (R_D).

Para definir os ganhos dos controladores PI e P, o CR e a resistência de amortecimento ativo são inicialmente desativados ($R_D=0$ e $K_{Rv}=0$), considerando uma frequência de chaveamento igual a 12 kHz. Cada malha de controle é projetada considerando a frequência desejada de *crossover* e margem de fase, por meio da função de transferência de malha aberta obtida da Figura 4. Para a malha de tensão, é adotada uma frequência de *crossover* de 660 Hz e uma margem de fase de 60° . Já na malha de corrente é adotada uma frequência de *crossover* igual a 1,2 kHz e uma margem de fase de 60° (Yazdani and Irvani, 2010). Os ganhos obtidos com o projeto são $K_{pi}=0,6 \Omega$, $K_{pv}=0,9 \Omega^{-1}$ e $K_{iv}=68 \Omega^{-1}s^{-1}$, adotando um sensor de corrente (H_i) igual a $\frac{1}{280} (VA^{-1})$ e um sensor de tensão (H_v) igual a $\frac{1}{150} (VV^{-1})$.

Para garantir uma operação estável do CR é utilizado um filtro passa-baixa (FPB), com uma frequência de corte (w_c) igual a 900 Hz, de modo a adequar a faixa de passagem que o conversor pode operar (Chen et al., 2008).

Quando o FPB e o controlador PI são adicionados à malha de tensão, os polos do CR são deslocados, porque ambas as estruturas não possuem característica de fase nula em sua resposta de frequência (Erickson and Maksimovic, 2007). Para avaliar a correção necessária nos polos do CR, a função de transferência de tensão em malha aberta é esboçada e ilustrada na Figura 5. Utilizando uma implementação digital do CR com $T_s=12$ kHz, um avanço de fase igual a três amostras é adicionado, forçando o atraso do CR para $z^{(-100+3)}$. Usando a função de transferência do sistema, é possível observar que com um ganho K_{Rv} igual a 0,25 é possível melhorar a faixa de passagem da malha de tensão, além de prover uma faixa de passagem menor que a malha de corrente. A Figura 6 apresenta o diagrama de Bode da função de transferência de malha fechada da tensão, considerando o amortecimento ativo R_D igual a 0,25 Ω .

A Figura 7 mostra o bloco de referência de tensão definido na Figura 4, que propicia a operação como uma fonte de tensão controlada nos Modos III e IV. Para o conversor monofásico é usado um PLL baseado no produto interno instantâneo das funções ortogonais, como definido por Padua et al. (2007).

Da Figura 7, quando a variável ref_v é igual a zero, não é gerada nenhuma referência de tensão, e o conversor opera em *standby*. Já a função de filtro ativo série é selecionada fazendo a variável ref_v igual a um. Nessa condição o conversor multifuncional opera no Modo III, com funcionalidade de suporte à rede. O PLL está sincronizado com a rede elétrica, com a variável $sinc_pll$ igual a um, gerando uma tensão de referência de 60 Hz (v_{FAS}). O sinal de referência é subtraído da tensão da rede medida (v_s) e é gerada uma referência que deve ser produzida em série com a rede elétrica ($v_{ref}=v_{FAS}$).

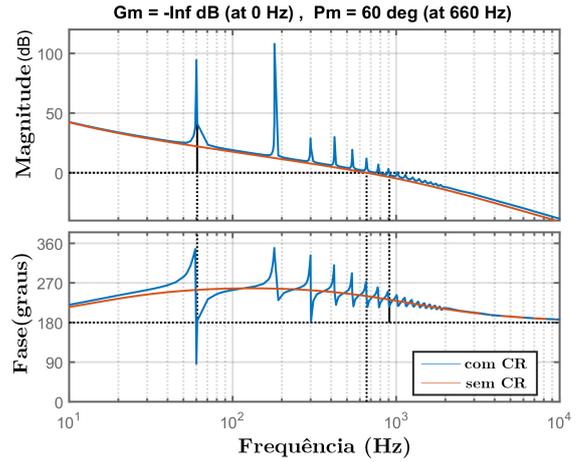


Figura 5. Diagrama de Bode da função de transferência de malha aberta.

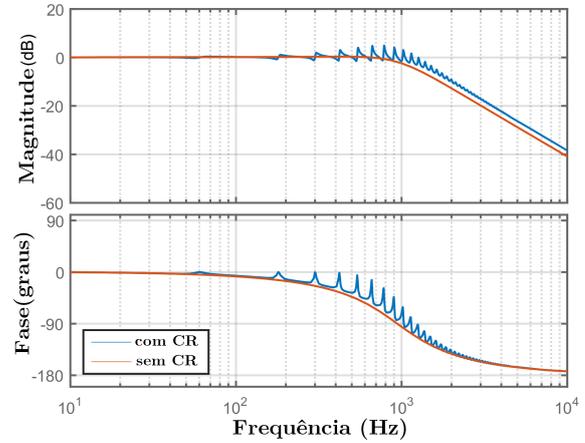


Figura 6. Diagrama de Bode da função de transferência de malha fechada.

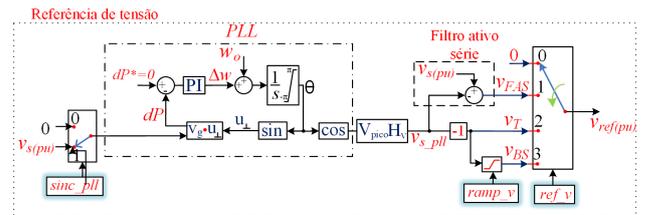


Figura 7. Bloco para referência de tensão utilizado no conversor multifuncional.

Para a transição do modo conectado à rede para o modo ilhado (I_{T-I}), o PLL é desconectado da medição da rede, fazendo a variável $sinc_pll$ igual a zero no diagrama da Figura 7. A ação de *feedforward* (w_o) do PLL produz uma referência de tensão senoidal. A variável ref_v é então definida como sendo igual a dois e o conversor passa a operar no Modo IV.

Já considerando o procedimento de *black-start* no Modo IV, a referência de tensão é gerada fazendo a variável ref_v igual a 3 na Figura 7. Nessa condição, o PLL ($sinc_pll$ igual a zero) gera a referência de tensão senoidal. Entretanto, o sinal de referência (v_{BS}) é somente ativado com a variável $ramp_v$ igual a um, o que permite criar

uma rampa de tensão com duração de quatro ciclos da frequência fundamental.

Por último, a transição de reconexão do modo ilhado para o conectado à rede (R_{T-I}) com o conversor multifuncional operando em série (Modo III) é inicializada com a variável ref_v igual a um. Porém, isso só pode ser feito se e somente se a variável $sinc_pll$ for igual um, indicando que a tensão da rede e da microrrede estão sincronizadas.

4. ANÁLISE E OPERAÇÃO DA MICRORREDE COM CONVERSOR MULTIFUNCIONAL

A microrrede monofásica utilizada como modelo para os estudos deste trabalho é apresentada na Figura 8. Segundo o padrão IEEE 1547.4 (IEEE, 2011), a configuração é do tipo ilha secundária, com uma fonte de geração distribuída, consumidores e rede de distribuição de baixa tensão (BT).

A fonte de geração distribuída da microrrede é formada por um conversor supridor de rede (CSR), com capacidade de suprir parcialmente/totalmente as cargas elétricas, dependendo do instante de operação do sistema elétrico. A microrrede também é composta por uma chave estática ideal, que permite a operação ilhada e conectada à rede elétrica principal.

As cargas da microrrede são do tipo linear e não-linear. A carga linear possui impedância constante, do tipo RL. A carga não-linear é formada por um retificador à diodos monofásico em ponte completa, com capacitor e resistor no lado CC (Antunes et al., 2017). O lado CC do conversor multifuncional é formado por uma fonte CC ideal, uma vez que os resultados gerados perfazem um período de tempo muito curto, na qual a oscilação de tensão CC causada pelo *buck-boost* pode ser desprezada, sem perda de generalidade. Todo o modelo é desenvolvido na plataforma Matlab/Simulink.

A Tabela 1 apresenta os principais parâmetros da microrrede. A seguir são apresentados os resultados com demonstração da operação do conversor multifuncional em seus modos e transições.

Tabela 1. Parâmetros elétricos da microrrede.

Sistema	Parâmetros
Rede elétrica	1Φ , 127 V (1pu), 60 Hz, $S_{cc}=1$ MVA $X/R=0,5$
Multifuncional	1Φ VSI, 25 kVA, $f_{sw}=12$ kHz, $L_1=43$ μ H, $R_1=11$ m Ω , $C_f=411$ μ F, $V_{CC}=311$ V
CSR	1Φ VSI, 25 kVA, $f_{sw}=12$ kHz, $L_1=170$ μ H $R_1=64$ m Ω , $R_f=50$ m Ω , $C_f=100$ μ F $V_{CC}=311$ V
Carga linear	13 kVA, $fp=0,8$ atrasado
Carga não-linear	127V, 10kW, $C_{CC}=30$ mF, $R_L=3\Omega$ $R_{CA}=64$ m Ω , $L_{CA}=30$ μ H

4.1 Cenário I - Filtro Ativo Série e Transição para Modo Ilhado

No cenário I, a microrrede está inicialmente no modo conectado à rede e o conversor multifuncional opera provendo suporte à rede, com conexão série no Modo III. Em um dado instante, ocorre um ilhamento intencional (I_{T-I}) e o conversor multifuncional passa a operar como formador

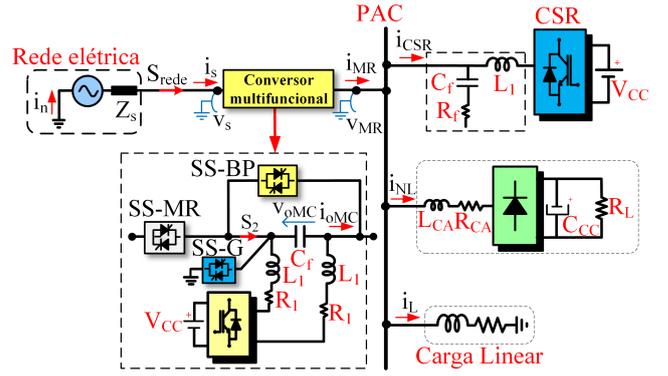


Figura 8. Configuração da microrrede monofásica em estudo.

de rede no Modo IV. A sequência de operação é detalhada como:

- $t=0$ s - o conversor multifuncional conecta a microrrede na rede elétrica principal (Modo II- T_I);
- $t=(1/60)$ s - a carga RL é conectada e o conversor multifuncional passa a operar como filtro ativo série no Modo II (T_{II});
- $t=(3/60)$ s - a tensão na rede passa a ficar distorcida, com os seguintes harmônicos: $v_{3h}=0,1$ pu, $v_{5h}=0,05$ pu, $v_{7h}=0,025$ pu e $v_{11h}=0,01$ pu;
- $t=(6/60)$ s - a tensão na rede retorna a 1 pu sem distorção harmônica;
- $t=(8/60)$ s - um *swell* de 1,2 pu ocorre na rede elétrica;
- $t=(11/60)$ s - um *sag* de 0,5 pu ocorre na rede elétrica;
- $t=(14/60)$ s - o conversor multifuncional muda intencionalmente para o Modo IV (I_{T-I}) e a microrrede passa a operar no modo ilhado;
- $t=(17/60)$ s - uma carga $R_L=3\Omega$ é conectada no lado CC da carga não-linear;
- $t=(22/60)$ s - fim da simulação.

Da Figura 9 é possível observar que a tensão no PAC da microrrede fica senoidal, mesmo com a presença de harmônicos na tensão, além de afundamentos (*sags*) e elevações (*swells*) de tensão na rede elétrica. Para o instante $t=(3/60)$ s, a tensão na rede possui uma Taxa de Distorção Harmônica de Tensão (TDH v_s) de 12%. Porém, com a operação do conversor multifuncional como filtro ativo série, a TDH v_{MR} na microrrede é reduzida para 1,7%. No instante $t=(14/60)$ s, o conversor multifuncional realiza uma transição suave para o modo ilhado e passa a suprir as cargas elétricas da microrrede.

Na Figura 10 é possível notar que não ocorrem distúrbios na forma de onda da corrente no PAC da microrrede na transição intencional para o modo ilhado. Durante o modo conectado à rede, a corrente da microrrede (i_{MR}) é suprida pela rede principal, enquanto no modo ilhado passa a ser suprida pelo sistema de armazenamento do conversor multifuncional. Já na Figura 11, é possível notar o fluxo bidirecional de potência no conversor multifuncional, com absorção de potência ativa durante a compensação do afundamento de tensão. Por último, na Figura 12, é ilustrada a resposta da malha de tensão do conversor multifuncional. Até o instante $t=(14/60)$ s, a referência prevê funcionalidade de filtro ativo série, enquanto pos-

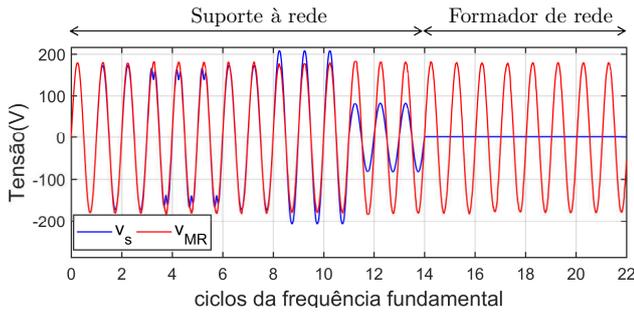


Figura 9. Resultados do cenário I com formas de onda da tensão na rede (v_s) e no PAC da microrrede (v_{MR}).

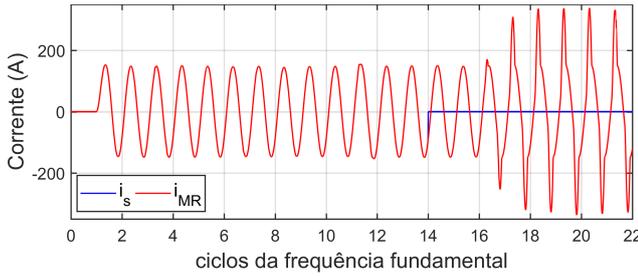


Figura 10. Resultados do cenário I com formas de onda da corrente na rede e microrrede (i_{MR}).

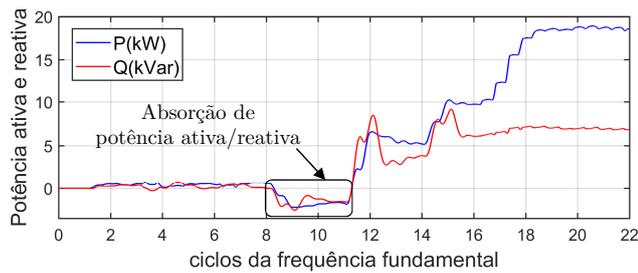


Figura 11. Resultados do cenário I com formas de onda da potência ativa e reativa do conversor multifuncional.

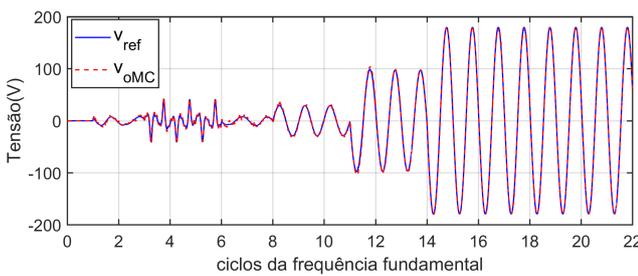


Figura 12. Resultados do cenário I com formas de onda da reposta da malha de controle de tensão.

teriormente a esse instante é produzida tensão nominal na saída do conversor.

4.2 Cenário II - Operação no Modo Ilhado

O Cenário II demonstra a funcionalidade do conversor multifuncional como formador de rede (Modo IV) no modo ilhado. Para essa condição, é considerada a presença do conversor supridor na microrrede e cargas elétricas. Os resultados de simulação são apresentados, com a respectiva seqüência de operação:

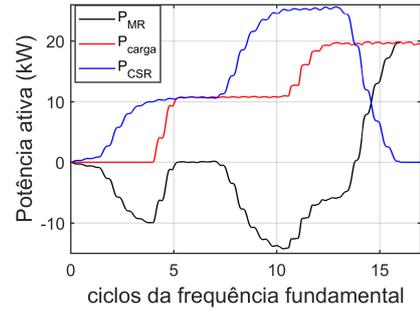


Figura 13. Resultados do cenário II com potência ativa na microrrede.

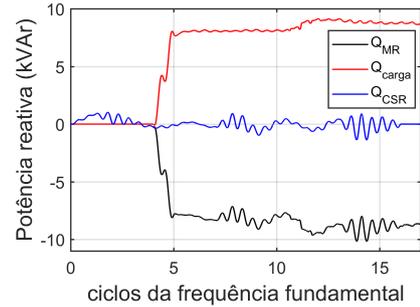


Figura 14. Resultados do cenário II com potência reativa na microrrede.

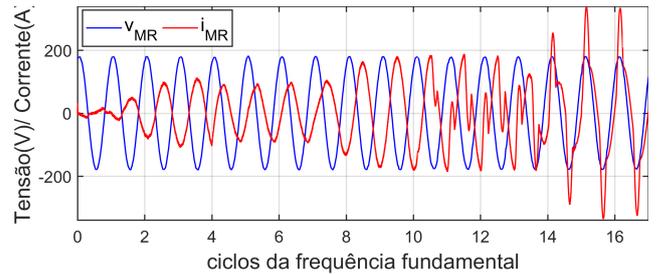


Figura 15. Resultados do cenário II com tensão da microrrede (v_{MR}) e corrente da microrrede (i_{MR}).

- $t=0s$ - O PAC da microrrede é energizado pelo conversor multifuncional operando como formador de rede (Modo IV);
- $t=(1/60)s$ - o supridor de rede é conectado e passa a injetar 11 kW;
- $t=(4/60)s$ - a carga RL é conectada;
- $t=(7/60)s$ - o supridor de rede passa a injetar 25 kW na microrrede;
- $t=(10/60)s$ - uma carga $R_L=3 \Omega$ é conectada no lado CC da carga não-linear;
- $t=(13/60)s$ - o supridor de rede passa a reduzir a potência injetada na rede;
- $t=(16/60)s$ - o supridor de rede é desconectado da microrrede.
- $t=(17/60)s$ - fim da simulação.

Da Figura 13, é possível notar que inicialmente o conversor formador de rede absorve toda a potência ativa produzida pelo gerador distribuído em seu barramento CC, até o instante $t=(4/60)s$. Nesse momento, a carga linear é conectada, como ilustrado na Figura 16, passando a ser suprida pelo gerador distribuído, e posteriormente pelo formador de rede.

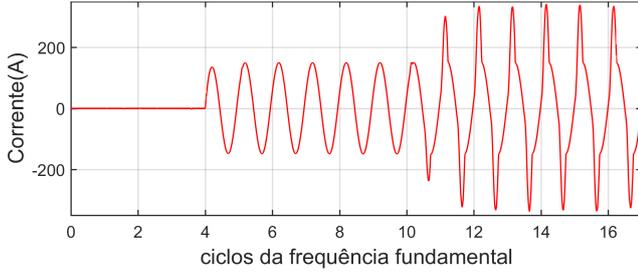


Figura 16. Resultados do cenário II com corrente da carga ($i_L + i_{NL}$)

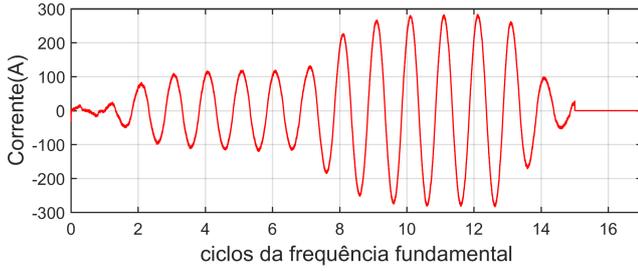


Figura 17. Resultados do cenário II corrente do suprimento de rede (i_{CSR}).

Já na Figura 14 é ilustrado que toda a potência reativa é suprida pelo formador de rede, pois o suprimento de rede somente contribui com a injeção de potência ativa. Da Figura 15 à Figura 17 é possível observar as principais formas de onda da tensão e corrente da microrrede. A forma de onda da tensão no PAC se mantém senoidal, mesmo com a conexão das cargas e do gerador distribuído. A máxima $TDH_{v_{MR}}$ no PAC é de 1,9%, mesmo com a presença de carga elétrica não-linear e do suprimento de rede.

4.3 Cenário III - Reconexão ao Modo Conectado à Rede

Para o Cenário III, é avaliada a transição de reconexão R_{T-III} , considerando que o conversor multifuncional volta a operar no modo conectado à rede com a conexão série (Modo III). O conversor multifuncional opera como formador de rede (Modo IV) e a microrrede encontra-se no modo ilhado. Os principais resultados para o cenário são avaliados com a seguinte sequência de conexão na microrrede:

- $t=0$ s - a microrrede opera no modo ilhado e o conversor multifuncional inicia o *black-start* (B_{ST}). A rede principal não está disponível.
- $t=(5/60)$ s - a carga não-linear é conectada na microrrede;
- $t=(6/60)$ s - a rede elétrica passa a ficar disponível e o conversor multifuncional inicia a sincronização da tensão da microrrede com a rede elétrica ($sinc_pll=1$);
- $t=(24/60)$ s - depois de sincronizada a rede e microrrede, as chaves $SS-MR$ e S_2 são fechadas e a chave $SS-G$ é aberta (Modo III - R_{T-III}). O conversor multifuncional passa a operar como um filtro ativo série;
- $t=(34/60)$ s - fim da simulação.

Da Figura 18, é possível observar que, durante a transição do modo ilhado para o conectado, não ocorre nenhum distúrbio na tensão da microrrede. Finalizada a transição de reconexão R_{T-III} , o conversor multifuncional passa a

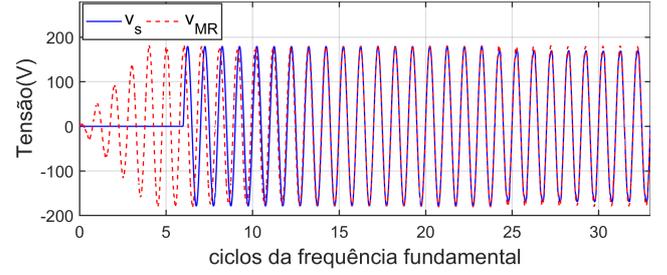


Figura 18. Resultados do cenário III com formas de onda da tensão (v_{MR}) e corrente na microrrede (i_{MR}).

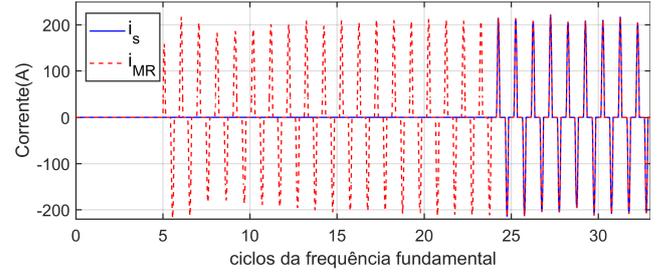


Figura 19. Resultados do cenário III com formas de onda da tensão v_s e corrente na rede (i_s);

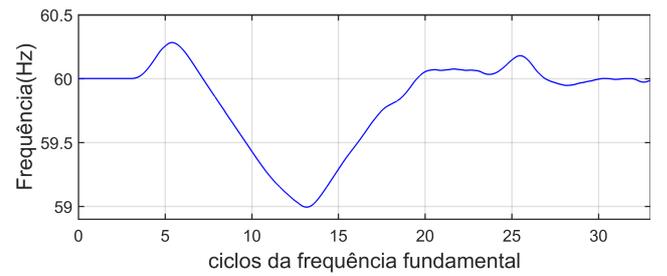


Figura 20. Resultados do cenário III com formas de onda da frequência elétrica na microrrede.

operar como filtro ativo série, mantendo a tensão na microrrede com valor igual à tensão nominal. Já na Figura 19 é possível notar que após a transição, a corrente passa a ser suprida pela rede. Com relação à frequência na microrrede, na Figura 20, nota-se uma queda de 1 Hz durante o sincronismo das tensões da rede e microrrede, porém a frequência nominal é restabelecida depois de alguns ciclos no modo conectado à rede.

5. CONCLUSÃO

Nesse trabalho foram propostos e apresentados por meio de simulação os três modos de operação do conversor multifuncional, com transição entre os modos de operação. Para isso, foi desenvolvido o modelo de uma microrrede monofásica, formada pelo conversor multifuncional, suprimento de rede e carga elétrica do tipo linear e não-linear. Toda a microrrede operou com controle centralizado na configuração mestre-escravo, o que permite contemplar uma análise de fluxo de potência, da tensão e frequência no PAC da microrrede, dentre outras grandezas elétricas.

Operando no Modo III como um filtro ativo série, o conversor multifuncional regulou tensão no PAC da microrrede, além de compensar afundamentos e elevações de tensão de curta duração e harmônicos de tensão. Como formador

de rede no Modo IV, o conversor multifuncional forneceu funcionalidade de *black-start* para a microrrede, suprindo cargas elétricas do tipo linear e não-linear, com a presença de um gerador distribuído.

Já com relação à transição destaca-se o ilhamento intencional. Foi proposta a transição de ilhamento I_{T-I} , em que o conversor multifuncional inicialmente opera como um filtro ativo série e comuta suas chaves e controle para o Modo IV, passando a operar como formador de rede. Para a transição de reconexão do modo ilhado para conectado R_{T-I} , o conversor multifuncional transferiu sua operação no modo conectado para filtro ativo série, permanecendo em toda a transição com controle em tensão.

Os resultados de simulação demonstraram que a configuração multifuncional é promissora, com capacidade de prover múltiplas funções em conversores eletrônicos aplicados em microrredes com controle centralizado, especialmente aquelas em que cargas são mais sensíveis e requerem um compensador série com capacidade de operação com suprimento ininterrupto de energia (*Uninterruptible Power System*, UPS).

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a UFES e o Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFMG pelo suporte à pesquisa e o CNPq, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

- Antunes, H.M.A., Silva, S.M., Brandao, D.I., Ferreira, R.V., and Braz de Jesus Filho, C. (2017). Analysis of a grid-forming converter based on repetitive control in centralized ac microgrid. In *Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), 2017 IEEE 8th International Symposium on*, 1–8. IEEE.
- Azevedo, G.M.S., Cavalcanti, M.C., Neves, F.A.S., Limongi, L.R., and Bradaschia, F. (2013). A control of microgrid power converter with smooth transient response during the change of connection mode. In *Power Electronics Conference (COBEP), 2013 Brazilian*, 1008–1015. doi:10.1109/COBEP.2013.6785238.
- Bhende, C. and Kalam, A. (2013). Power quality conditioner for microgrid. In *2013 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC)*, 1–4. IEEE.
- Bouzaïd, A.M., Guerrero, J.M., Cheriti, A., Bouhamida, M., Sicard, P., and Benghanem, M. (2015). A survey on control of electric power distributed generation systems for microgrid applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 44, 751–766.
- Chen, S., Lai, Y., Tan, S.C., and Tse, C.K. (2008). Analysis and design of repetitive controller for harmonic elimination in pwm voltage source inverter systems. *IET Power Electronics*, 1(4), 497–506.
- Erickson, R.W. and Maksimovic, D. (2007). *Fundamentals of power electronics*. Springer Science & Business Media.
- Farhadi-Kangarlu, M., Babaei, E., and Blaabjerg, F. (2017). A comprehensive review of dynamic voltage restorers. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 92, 136–155.
- Han, X., Cheng, R., Wang, P., and Jia, Y. (2013). Advanced dynamic voltage restorer to improve power quality in microgrid. In *Power and Energy Society General Meeting (PES), 2013 IEEE*, 1–5. IEEE.
- IEEE (2011). *IEEE Std 1547.4-2011: IEEE Guide for Design, Operation, and Integration of Distributed Resource Island Systems with Electric Power Systems*. doi:10.1109/IEEESTD.2011.5960751.
- Lasseter, R.H. (2002). Microgrids. In *Power Engineering Society Winter Meeting, 2002. IEEE*, volume 1, 305–308 vol.1. doi:10.1109/PESW.2002.985003.
- Li, P., Li, Y., and Yin, Z. (2015). Realization of upqc hifinite coordinated control in microgrid. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 65, 443–452.
- Lopes, J.P., Moreira, C., and Madureira, A. (2006). Defining control strategies for microgrids islanded operation. *IEEE Transactions on power systems*, 21(2), 916–924.
- Miveh, M.R., Rahmat, M.F., Ghadimi, A.A., and Mustafa, M.W. (2015). Power quality improvement in autonomous microgrids using multi-functional voltage source inverters: a comprehensive review. *Journal of Power Electronics*, 15(4), 1054–1065.
- Padua, M., Deckmann, S., Sperandio, G., Marafao, F., and Colon, D. (2007). Comparative analysis of synchronization algorithms based on pll, rdft and kalman filter. In *Industrial Electronics, 2007. ISIE 2007. IEEE International Symposium on*, 964–970. IEEE.
- Parhizi, S., Lotfi, H., Khodaei, A., and Bahramirad, S. (2015). State of the art in research on microgrids: A review. *IEEE Access*, 3, 890–925. doi:10.1109/ACCESS.2015.2443119.
- Rocabert, J., Luna, A., Blaabjerg, F., and Rodríguez, P. (2012). Control of power converters in ac microgrids. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 27(11), 4734–4749. doi:10.1109/TPEL.2012.2199334.
- Sharkh, S.M., Abu-Sara, M.A., Orfanoudakis, G.I., and Hussain, B. (2014). *Power electronic converters for microgrids*. John Wiley & Sons.
- Silva, A.F.B.O. (2012). *Aplicação de controle repetitivo em inversor PWM monofásico com filtro LC de saída utilizado em fonte programável C.A.* Master's thesis, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica UFSJ/CEFET-MG.
- Silva, F.S.F., de S. Ribeiro, L.A., and de Matos, J.G. (2014). Bidirectional dc-ac converter for isolated microgrids with voltage unbalance reduction capabilities. In *2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 4985–4991. doi:10.1109/ECCE.2014.6954085.
- Silva, S.M. and Filho, B. (2002). Component-minimized voltage sag compensators. In *Conference Record of The IEEE Industry Applications Conference*, volume 2, 883–889.
- Teke, A. and Latran, M.B. (2014). Review of multi-functional inverter topologies and control schemes used in distributed generation systems. *Journal of Power Electronics*, 14(2), 324–340.
- Yazdani, A. and Iravani, R. (2010). *Voltage-sourced converters in power systems: modeling, control, and applications*. John Wiley & Sons.
- Zhou, K., Low, K.S., Wang, D., Luo, F.L., Zhang, B., and Wang, Y. (2006). Zero-phase odd-harmonic repetitive controller for a single-phase pwm inverter. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 21(1), 193–201.