

REVISÃO DAS ESTRATÉGIAS CLÁSSICAS DE CONTROLE PARA INVERSORES OPERANDO EM PARALELO

Fábio Pereira de OLIVEIRA¹

Analista de Desenvolvimento/Ragtech
Discente do curso de Mestrado em Automação e Controle de Processos
IFSP/Campus São Paulo

Ricardo Naoki MORI²

Doutor em Engenharia Elétrica/USP
Docente do IFSP/Campus São Paulo

RESUMO

Há cerca de 30 anos, pesquisadores têm estudado o paralelismo de inversores de tensão para o aumento da capacidade e redundância de sistemas nas mais diversas áreas. O crescente uso de energias renováveis tem impulsionado as pesquisas mais recentes. Contudo, este paralelismo ainda apresenta grandes desafios ao controle devido às dinâmicas das variáveis envolvidas. Muitas técnicas foram desenvolvidas sobre o tema, cada qual com suas peculiaridades. Este artigo revisa e classifica as propostas mais empregadas neste período, as quais são a base das soluções mais atuais. Estes métodos vão desde a utilização de um controlador central até o emprego de módulos autônomos e a utilização ou não de comunicação entre os elementos do sistema. O princípio de funcionamento, a estrutura, as vantagens e desvantagens de cada uma destas estratégias são expostos. E, ao final, são apresentadas considerações sobre a escolha da técnica mais adequada conforme a aplicação.

Palavras-chave: Inversores de tensão. Paralelismo. Estratégias de controle. Redundância.

Introdução

Inversor é o nome dado aos conversores de corrente contínua (CC) em corrente alternada (CA), cuja função é converter uma tensão de entrada CC em uma tensão de saída CA simétrica de amplitude e frequência desejadas. Os inversores são amplamente utilizados em aplicações industriais, como acionamento de máquinas CA em velocidade

¹ Endereço eletrônico: foliveira@ragtech.com.br

² Endereço eletrônico: ricardo.naoki.mori@gmail.com

variável, aquecimento indutivo e sistema de energia ininterrupta (SEI) (RASHID, 1999).

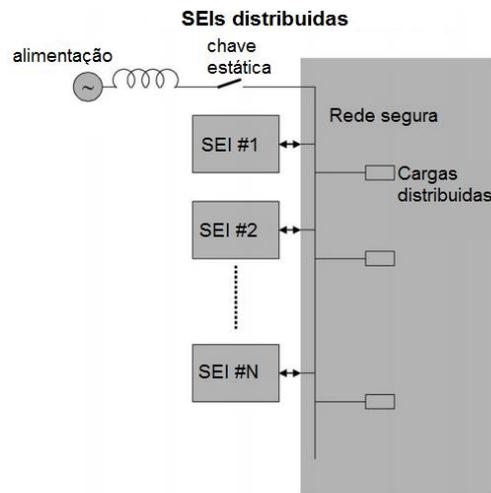
A operação em paralelo de inversores senoidais com frequência e tensão constantes foi desenvolvida, inicialmente, na aplicação de SEIs, ou para se obter uma redundância em paralelo altamente confiável, ou para construir sistemas de grande capacidade energética. Mas, desde o final da década de 80, o uso de sistemas operando em paralelo se espalhou por várias áreas como sistemas de geração de energia baseados em células fotovoltaicas, fontes de energias auxiliares para trens e barcos, e assim por diante (KAWABATA; HIGASHINO, 1988).

Recentemente, a utilização de fontes de energia alternativas à geração hidroelétrica e à termoelétrica têm crescido devido à busca de alternativas de geração que não sejam dependentes de fatores climáticos ou que causem impactos ambientais significativos.

A geração alternativa é desenvolvida através da geração distribuída (GD), que significa que os sistemas de geração de energia (SGEs) estão situados próximos aos consumidores de energia e grandes unidades geradoras são substituídas por outras menores em maior número. A maioria destas fontes de energia alternativa gera energia elétrica em CC e depois é convertida em CA por um inversor, tais circuitos se tornaram essenciais para a GD (MOHD *et al.*, 2010).

Entretanto, a conexão de inversores de SEIs em paralelo é um problema desafiador por ser mais complexo que o paralelismo de fontes CC, já que cada inversor deve compartilhar a carga adequadamente enquanto permanecem sincronizados. Teoricamente, se a tensão de saída de cada inversor tiver a mesma amplitude, frequência e fase, a corrente da carga pode ser igualmente distribuída. Mas devido às diferenças físicas entre os inversores e às características de impedância de linha, a carga não é devidamente compartilhada. Isso permite a circulação de corrente entre os inversores, podendo danificá-los ou sobrecarregá-los (GUERRERO; HANG; UCEDA, 2008). A Figura 1 mostra um exemplo de rede formada por SEIs em paralelo para alimentar cargas distribuídas.

Figura 1- Rede formada por SEIs em paralelo



Fonte: Traduzido de GUERRERO; HANG; UCEDA, 2008

Na literatura, é possível encontrar muitos trabalhos com propostas de controle ativo para o paralelismo de inversores, que podem ser divididos entre aqueles que dependem de comunicação entre os inversores e os que não dependem. As propostas com comunicação são subdivididas em controle mestre-escravo, controle centralizado e controle distribuído, enquanto as sem comunicação são baseadas no decaimento (*droop*) de tensão e frequência em função das potências ativa e reativa (LAZZARIN, 2010).

Estratégias de controle baseadas em comunicação

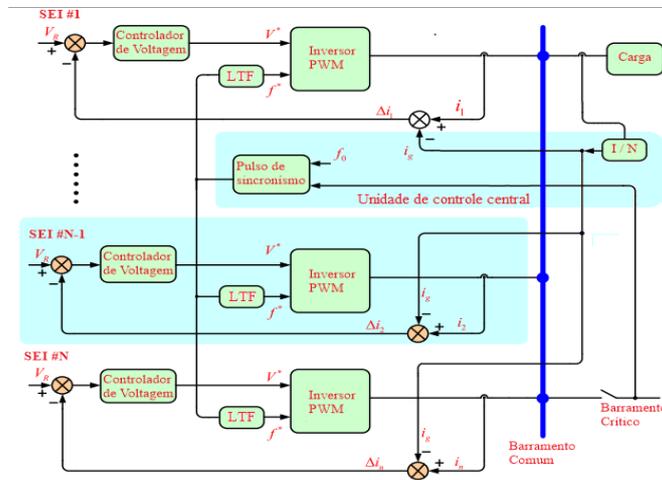
As técnicas de controle com comunicação entre os inversores apresentam bons índices de regulação de voltagem e compartilhamento de potência. Além disso, ao contrário dos métodos sem comunicação, a tensão de saída se encontra geralmente próxima do seu valor nominal. No entanto, essas estratégias necessitam de linhas de comunicação entre seus componentes que tornam o sistema mais caro e mais vulnerável a ruídos, principalmente quando envolvem grandes distâncias. Isso pode também reduzir a confiabilidade e expansibilidade do sistema, assim como limitar sua flexibilidade (VANDOORN *et al.*, 2013).

Controle central ou concentrado

No método de controle central, um controlador central coordena as interfaces de energia eletrônica na rede segura para manter o equilíbrio na potência ativa P e a potência reativa Q em condições de estado estacionário. É necessário um canal de comunicação entre o controlador central e cada unidade. O controle central tem a vantagem de usar algoritmos de controle simples nos conversores. Todavia, são necessárias grandes despesas para as linhas de comunicação e um centro de controle de supervisão. Por isso, o controle central é difícil de implementar em sistemas altamente distribuídos e grandes. O controle central também dificulta a expansão do sistema (VANDOORN *et al.*, 2013).

No esquema da Figura 2, a unidade de controle central monitora a frequência e a fase do barramento crítico, além de fornecer pulsos de sincronização gerados pelo oscilador para cada inversor, quando o barramento crítico é desconectado. O laço de travamento de fase (LTF) (*phase locked loop – PLL*) em cada inversor é usado para garantir o sincronismo de frequência e fase entre a tensão de saída e o sinal de sincronização. A unidade de controle paralela utiliza a corrente de carga total I , dividida pelo número de inversores de operação n , como referência de corrente para cada inversor. Ao mesmo tempo, cada unidade inversora usa a sua própria corrente de saída para calcular o erro corrente. No caso de cada unidade paralela controlada por um sinal de sincronização ter uma diferença desprezível em frequência e fase entre si, o erro de corrente de cada unidade pode ser considerado resultante de uma diferença de amplitude de tensão. Portanto, este método adiciona diretamente o erro de corrente à unidade inversora como componente de compensação da referência de tensão, para eliminar o desequilíbrio na corrente (SHANXU, *et al.*, 1999).

Figura 2- Esquema de um controle central



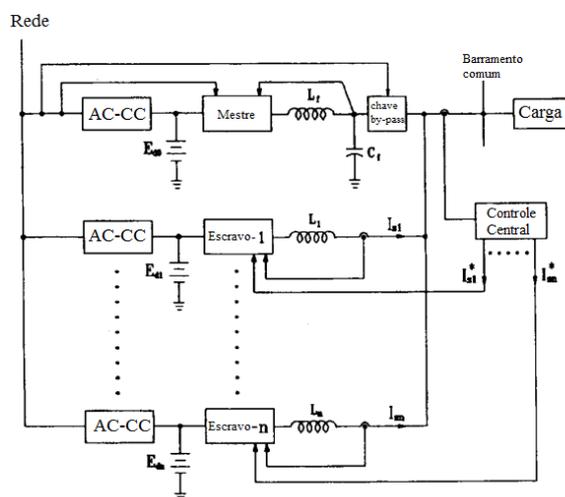
Fonte: Alterado de HAN *et al.* (2016)

Uma vantagem desse método é que o compartilhamento atual é forçado em todo o tempo, mesmo durante transientes. Nesses casos, o sistema tentará recuperar a tensão de saída usando os controles de tensão e corrente. O laço de tensão fará isso fornecendo novos valores de corrente, enquanto o laço de corrente tentará encontrar novas demandas de corrente. A principal desvantagem é que ambos V_e e I_{ref} devem ser distribuídos a todos os conversores usando um canal de comunicação de alta largura de banda para sincronizar as unidades (PRODANOVIC; GREEN; MANSIR, 2000).

Controle mestre-escravo

O controle mestre-escravo (Figura 3) é constituído por uma unidade mestre, que provê tensão e frequência de saída constante, enquanto outras unidades escravas seguem uma referência de corrente para alcançar uma mesma distribuição de corrente. Essa referência de corrente é fornecida por uma unidade central que se baseia na corrente total da carga, semelhante ao controle central. Como a corrente da carga acompanha a frequência da tensão de saída controlada pela unidade mestre, as unidades escravas não precisam de laços de travamento de fase para sincronização. Isso simplifica a implementação do sistema e facilita sua expansão (CHEN; CHU, 1995).

Figura 3- Esquema de um controle mestre-escravo com controle central

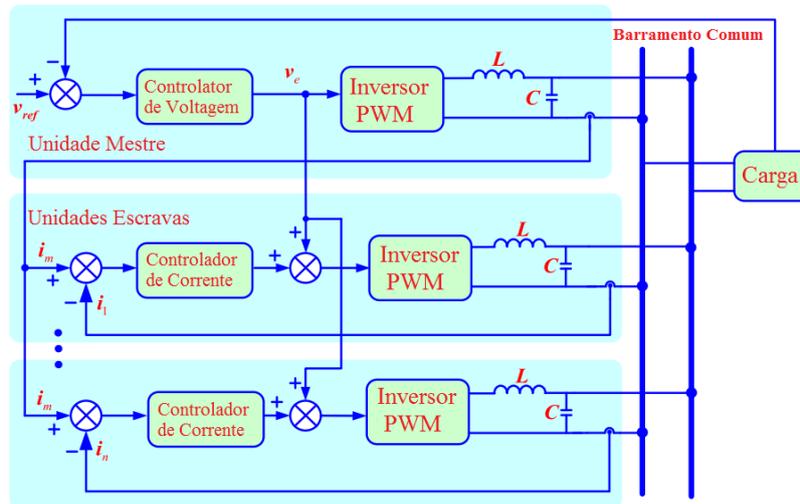


Fonte: Traduzido de CHEN; CHU (1995)

Em outra estrutura de controle mestre-escravo (Figura 4), o controle central é eliminado e a referência de corrente passa a ser fornecida pela unidade mestre. Essa referência de corrente é obtida a partir da corrente de saída do mestre, ao invés da corrente total da carga (PRODANOVIC; GREEN; MANSIR, 2000). Apesar desta simplificação, este esquema também não oferece redundância total, porque uma falha na unidade mestre causa a falha de todo o sistema (HAN *et al.*, 2016).

Como solução para o problema da redundância, Petruzzello, Ziogas e Joos (1990) propõem um sistema no qual todas as unidades podem operar como mestres. As unidades que operam como escravos são numeradas aleatoriamente e, no caso de uma falha na unidade mestre atual, um escravo se torna o novo mestre, conforme sua numeração. Semelhantemente, PEI *et al.* (2004) apresentam uma seleção automática da unidade mestre baseada nas potências real e reativa de cada unidade do sistema. As potências individuais são agregadas por tipo em dois barramentos unidirecionais. A unidade com maior potência real e reativa tem primazia nos barramentos e torna-se o mestre, enquanto as demais seguem sua referência.

Figura 4- Esquema de um controle mestre-escravo sem controle central



Fonte: Traduzido de HAN *et al.* (2016)

Apesar de facilidade de implementação e do bom compartilhamento de potência, o controle mestre escravo não apresenta uma boa performance durante transientes. Nesses momentos, o sistema tentará recobrar a tensão de saída através do laço de tensão dentro da unidade mestre, o que pode levar a grandes variações de corrente nas unidades escravo (PRODANOVIC; GREEN; MANSIR, 2000).

Controle distribuído

O controle distribuído segue uma abordagem democrática em que o laço de tensão é distribuído entre as unidades. Assim, todos os inversores são idênticos e possuem um esquema de controle individual. As correntes são analisadas entre os inversores paralelos para o controle preciso de potência e tensão. A linearização e a robustez são alcançadas por meio de controladores de corrente. E, uma vez que o laço de tensão é distribuído, a tarefa do controle de distribuição de corrente é adequada a sistemas que exigem modularidade e expansibilidade (MONICA; KOWSALYA, 2016).

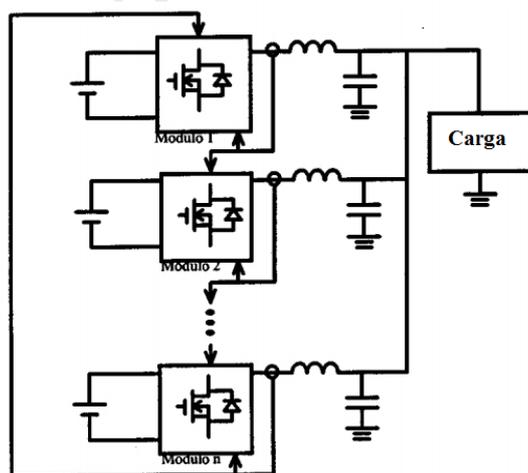
A regulação da tensão e o compartilhamento de energia estão bem controlados no controle distribuído. Contudo, as interconexões entre os inversores são ainda necessárias. Isso degrada a flexibilidade e a redundância do sistema. À medida que o número de módulos paralelos e a distância das linhas interligadas aumentam, espera-se

mais interferência no sistema (HAN *et al.*, 2016). O controle em cadeia circular e o controle por compartilhamento de corrente média instantânea são tipos de controle distribuído (MONICA; KOWSALYA, 2016).

Controle em cadeia circular

No controle em cadeia circular (Figura 5), o módulo seguinte rastreia a corrente do módulo anterior para obter uma distribuição de corrente igualitária e o primeiro módulo segue o último formando uma conexão em cadeia circular. A tensão e a corrente de saída de cada inversor são reguladas por um laço de corrente interno e um laço de tensão externo. O laço interno garante uma rápida resposta dinâmica, permitindo que amplitude, frequência e fase sejam sincronizadas e uma adequada distribuição de correntes entre os inversores seja alcançada. Entretanto, a interação entre os módulos inversores afeta a performance geral do sistema, e um controlador robusto é necessário para diminuir este efeito (WU; CHEN; HUANG, 2000).

Figura 5- Esquema de um controle em cadeia circular



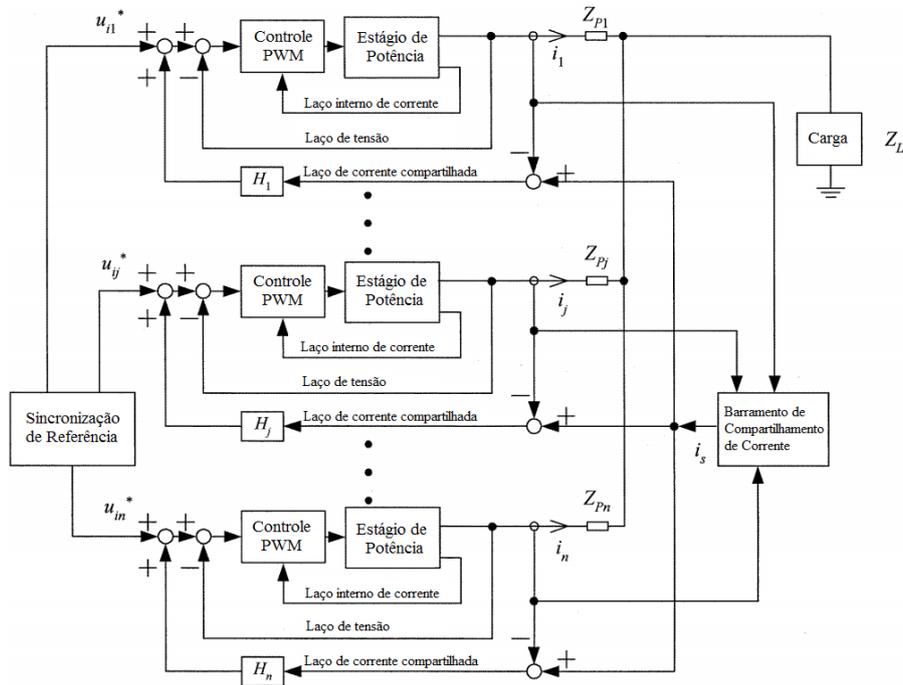
Fonte: Traduzido de WU; CHEN; HUANG (2000)

Controle por compartilhamento de corrente média instantânea

Neste método, exemplificado na Figura 6, os módulos são conectados a dois barramentos: um fornece uma referência de sincronismo e outro uma referência de corrente. A saída dos inversores é conectada à carga através de uma impedância. Cada inversor possui três laços de controle: o laço interno de corrente, o laço de tensão e o laço externo de compartilhamento de corrente. O laço interno de corrente provou ter um bom desempenho em ambas as respostas estáveis e transitórias para cada inversor do sistema. A referência de sincronismo garante que as tensões de saída de todos os inversores estão em fase.

Um laço externo de compartilhamento de corrente é adicionado para permitir que cada inversor contribua com a mesma potência para a carga. Cada inversor fornece uma medida de sua corrente de saída i_j para o barramento de compartilhamento atual, que gera a referência de corrente comum i_s . A referência pode ser a corrente de saída média, a maior corrente de saída ou a corrente de saída do inversor com a frequência de clock mais alta. O erro entre i_s e a corrente de saída de cada inversor é primeiro processado pelo controlador de compartilhamento de corrente H_j e depois adicionado na referência de tensão para alimentar a entrada de controle do inversor em questão. Com o alto ganho de H_j , o erro entre i_j e i_s tende a ser zero. Portanto, todas as correntes de saída dos inversores serão as mesmas (SUN; LEE; XU, 2003).

Figura 6- Esquema de um controle por compartilhamento de corrente média instantânea



Fonte: Traduzido de SUN; LEE; XU (2003)

Estratégias de controle baseadas em decaimento

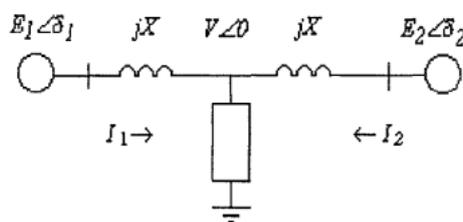
As estratégias de controle que operam sem comunicações entre as unidades para o controle de compartilhamento de energia são baseadas no método de decaimento. A operação sem linhas de comunicação geralmente é essencial para conectar inversores remotos. Isso pode evitar complexidade e altos custos, além de melhorar os requisitos de redundância e confiabilidade de um sistema de supervisão. Também, esse sistema é mais fácil de expandir, porque permite a substituição de uma unidade sem parar todo o sistema. Portanto, as linhas de comunicação são muitas vezes evitadas especialmente para longas distâncias e altos custos de investimento (HAN *et al.*, 2016).

Como o controle por decaimento não utiliza comunicação entre seus módulos, ele só pode contar com variáveis locais como a potência de saída. Para a operação estável de um sistema de energia, é necessário um bom controle do fluxo da potência real P e do fluxo da potência reativa Q . Para evitar a sobrecarga dos inversores, é importante garantir que as mudanças na carga sejam tomadas pelos inversores de forma predeterminada sem comunicação. Isso é obtido em sistemas de energia convencionais

com múltiplos geradores elétricos, introduzindo um decaimento na frequência de cada gerador com a potência real P fornecida pelo gerador, o que permite que cada gerador assuma mudanças na carga total de uma maneira determinada pelas suas características de decaimento de frequência e, essencialmente, use a frequência do sistema como uma linha de comunicação entre os sistemas de controle do gerador. Essa mesma filosofia é usada para garantir uma distribuição razoável da potência total entre inversores paralelos em um sistema autônomo de corrente alternada. Da mesma forma, um decaimento na tensão com potência reativa é usada para garantir o compartilhamento de energia reativa (CHANDORKAR; DIVAN; ADAPA, 1993).

A teoria para a aplicação do método é apresentada em Tuladhar *et al.* (1997). Os autores partem de um sistema simples com dois inversores conectados a uma carga através de indutâncias puras (Figura 7).

Figura 7- Sistema com dois inversores conectados a uma carga através de indutâncias puras



Fonte: TULADHAR *et al.* (1997)

A potência complexa correspondente ao inversor 1 na carga é dada por

$$S_1 = P_1 + jQ_1 = VI_1^* \quad \text{(Equação 1)}$$

onde S_1 é a potência aparente fornecida pelo inversor 1, V é a tensão sobre a carga e I_1^* é o conjugado da corrente do inversor 1 e é dado por

$$I_1^* = \left[\frac{E_1 \cos \delta_1 + j \sin \delta_1 - V}{jX} \right]^* \quad \text{(Equação 2)}$$

$$\therefore S_1 = V \left[\frac{E_1 \cos \delta_1 + j \sin \delta_1 - V}{jX} \right]^* \quad (\text{Equação 3})$$

onde E_1 é a amplitude da tensão de saída do inversor 1, e jX é a reatância do inversor 1.

Isso gera

$$P_1 = \frac{E_1 V}{jX} \sin \delta_1 \quad (\text{Equação 4})$$

$$Q_1 = \frac{E_1 V \cos \delta_1 - V^2}{jX} \quad (\text{Equação 5})$$

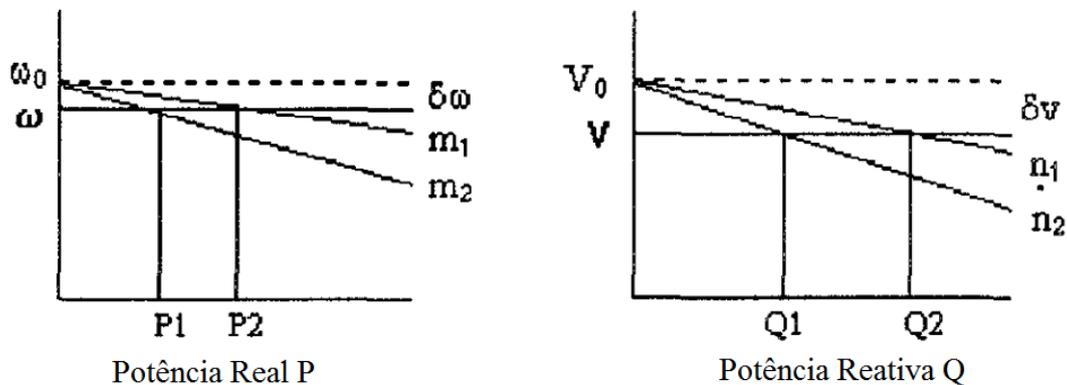
As equações 4 e 5 mostram que o fluxo da potência real Q_1 depende predominantemente do ângulo δ_1 , enquanto o fluxo da potência reativa é mais influenciado pela amplitude da tensão de saída do inversor E_1 . Dessa forma, o fluxo das potências real e reativa podem ser controlados através da introdução de um decaimento artificial na frequência e tensão do inversor. Assim, tem-se uma equação para a frequência e a amplitude de tensão:

$$\omega = \omega_o - m \cdot P \quad (\text{Equação 6})$$

$$V = V_o - n \cdot Q \quad (\text{Equação 7})$$

onde ω_o e V_o são, respectivamente, a frequência e a amplitude de tensão sem a presença da carga, enquanto m e n são, pela sequência, os coeficientes de decaimento de frequência e amplitude de tensão. A Figura 8 mostra as características de decaimento para dois inversores com taxas de potência diferentes.

Figura 8- Decaimento de frequência e amplitude em dois inversores diferentes



Fonte: TULADHAR *et al.* (1997)

Para que os dois inversores na figura 7 compartilhem as cargas real e reativa, proporcionalmente, de modo que a carga total do sistema seja a soma das cargas reais (P_1 e P_2) e reativas (Q_1 e Q_2), é preciso que os coeficientes de decaimento sejam selecionados como segue:

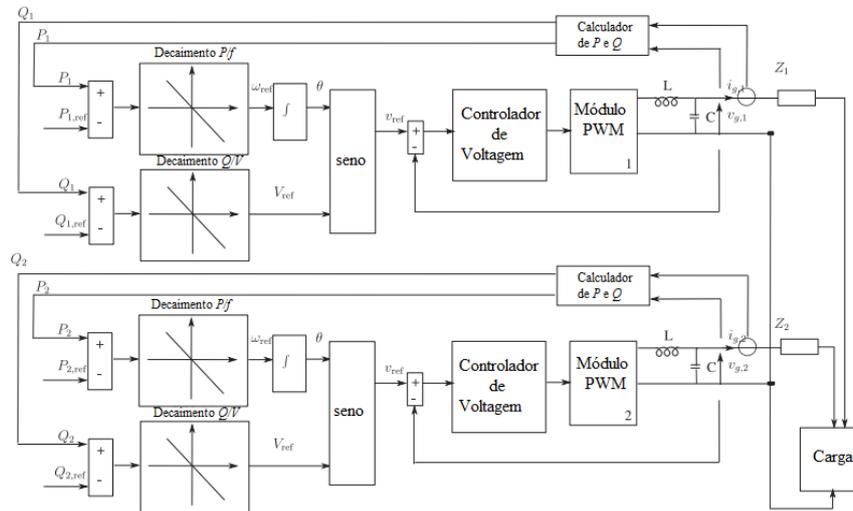
$$m_1 \cdot S_1 = m_2 \cdot S_2 = m_3 \cdot S_3 \dots = m_n \cdot S_n \quad (\text{Equação 8})$$

$$n_1 \cdot S_1 = n_2 \cdot S_2 = n_3 \cdot S_3 \dots = n_n \cdot S_n \quad (\text{Equação 9})$$

onde S_1, S_2, \dots, S_n são os valores de potência aparente dos inversores.

Devido às características de decaimento, a frequência e a tensão do sistema cairão para um valor tal que todas as unidades operarão em frequência e tensão mais baixas eliminando a corrente circulante entre os inversores. Assim, o conceito de decaimento conduz cada módulo a responder ao fluxo de energia de forma controlada (TULADHAR *et al.*, 1997). A figura 9 mostra um esquema de um controle por decaimento convencional.

Figura 9- Esquema de um controle por decaimento



Fonte: Traduzido de VANDOORN *et al.* (2013)

Em contrapartida, o controle por decaimento apresenta várias deficiências. Quando a impedância da linha entre os módulos não é altamente indutiva, como assumido, mas parcialmente resistiva, as potências real e reativa ficam fortemente acopladas e o método não funciona bem (LI; KAO, 2009; HE; LI, 2012). Cargas não lineares geram valores harmônicos que não são devidamente tratados, pois o controle por decaimento é baseado em valores fundamentais (TULADHAR *et al.*, 1997; TULADHAR *et al.*, 2000). Para o controle da potência, a estratégia causa desvios na frequência e amplitude que podem levar a instabilidade (TULADHAR *et al.*, 1997; HE; LI, 2012).

Para resolver esses e outros problemas, os pesquisadores propuseram diversas melhorias para o controle por decaimento. Tais melhorias estão além do escopo deste artigo, mas são amplamente discutidas em Monica e Kowsalya (2016) e Han *et al.* (2016).

Conclusão

Analisando cada estratégia exposta, vemos que todas atendem ao propósito de fazer com que inversores operem em paralelo e dividam as demandas da carga comum de forma equilibrada e segura. Nesta tarefa, os métodos apresentam diferentes níveis de eficiência, vantagens e desvantagens.

Se o paralelismo de inversores visa apenas ao aumento da capacidade de um sistema local, as estratégias de controle baseadas em comunicação (central, mestre-escravo e distribuído) são as mais indicadas, visto que, devido à proximidade entre as unidades, os custos referentes às linhas de comunicação são reduzidos, assim como a suscetibilidade a ruídos nelas. Além disso, estas estratégias apresentam uma implementação mais simples em relação ao controle por decaimento.

Quando a redundância também é uma exigência, precisa-se avaliar qual é o nível de redundância necessário. O controle central e o controle mestre-escravo com controle central não são considerados redundantes porque uma falha no controlador central compromete todo o sistema. Semelhantemente, o controle mestre-escravo sem o controle central oferece redundância às unidades escravas, exceto à unidade mestre. As unidades no controle distribuído são redundantes, mas estão sujeitas a falhas nas linhas de comunicação. Dessa forma, o controle por decaimento é o que apresenta melhor redundância por não depender de comunicação entre seus inversores.

Em casos em que os componentes do sistema estão distantes entre si, como na geração distribuída, as estratégias sem comunicação também são mais indicadas por sua independência e menor custo. Contudo, por atuar apenas com variáveis locais, o controle por decaimento apresenta maior complexidade de implementação que os demais e ainda possui algumas deficiências que precisam ser corrigidas.

Portanto, o que definirá a adoção de uma ou outra técnica será o objetivo principal que se pretende atingir com o paralelismo de inversores, uma vez que nenhuma das estratégias atende a todas as exigências completamente.

Referências

CHANDORKAR, M. C.; DIVAN, Deepakraj M.; ADAPA, Rambabu. Control of parallel connected inverters in standalone ac supply systems. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 29, n. 1, p. 136-143, 1993. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org.ez338.periodicos.capes.gov.br/stamp/stamp.jsp?arnumber=195899>>. Acesso em: 24 jun.2017.

CHEN, J.; CHU, C. Combination voltage-controlled and current-controlled PWM inverters for UPS parallel operation. *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 10, n. 5, p. 547-558, 1995. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org.ez338.periodicos.capes.gov.br/stamp/stamp.jsp?arnumber=406842>>. Acesso em: 24 jun.2017.

GUERRERO, J. M.; HANG, L.; UCEDA, J. Control of distributed uninterruptible power supply systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 55, n. 8, p. 2845-2859, 2008. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org.ez338.periodicos.capes.gov.br/stamp/stamp.jsp?arnumber=4582449>>. Acesso em: 04 jun.2017.

HAN, H. *et al.* Review of power sharing control strategies for islanding operation of AC microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, v. 7, n. 1, p. 200-215, 2016. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org.ez338.periodicos.capes.gov.br/stamp/stamp.jsp?arnumber=7121016>>. Acesso em: 24 jun.2017.

HE, J.; LI, Y. W. An enhanced microgrid load demand sharing strategy. *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 27, n. 9, p. 3984-3995, 2012. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org.ez338.periodicos.capes.gov.br/stamp/stamp.jsp?arnumber=6165374>>. Acesso em: 24 jun.2017.

KAWABATA, T.; HIGASHINO, S. Parallel operation of voltage source inverters. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 24, n. 2, p. 281-287, 1988. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org.ez338.periodicos.capes.gov.br/stamp/stamp.jsp?arnumber=2868>>. Acesso em: 04 jun.2017.

LAZARIN, T. B. *Paralelismo de inversores de tensão*. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010. 341p. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/93912/281188.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 04 jun.2017.

LI, Y. W.; KAO, C. An accurate power control strategy for power-electronics-interfaced distributed generation units operating in a low-voltage multibus microgrid. *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 24, n. 12, p. 2977-2988, 2009. Disponível em:

<<http://ieeexplore.ieee.org.ez338.periodicos.capes.gov.br/stamp/stamp.jsp?arnumber=5200415>>. Acesso em: 24 jun.2017.

MOHD, A. *et al.* Review of control techniques for inverters parallel operation. *Electric Power Systems Research*, v. 80, n. 12, p. 1477-1487, 2010. Disponível em: <http://ac-els-cdn-com.ez338.periodicos.capes.gov.br/S0378779610001392/1-s2.0-S0378779610001392-main.pdf?_tid=3dbd8f50-58e3-11e7-811a-00000aacb362&acdnat=1498312047_8e9ebaa22e1b3fd9fd07f859dc1a6141>. Acesso em: 22 jun.2017.

MONICA, P.; KOWSALYA, M. Control strategies of parallel operated inverters in renewable energy application: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 65, p. 885-901, 2016. Disponível em: <http://ac-els-cdn-com.ez338.periodicos.capes.gov.br/S1364032116303057/1-s2.0-S1364032116303057-main.pdf?_tid=43542256-5750-11e7-98ac-00000aacb360&acdnat=1498138969_d9861cda8610496c1e3542047ba4942c>. Acesso em: 22 jun.2017.

PEI, Y. *et al.* Auto-master-slave control technique of parallel inverters in distributed AC power systems and UPS. *Power Electronics Specialists Conference, 2004. PESC 04. 2004 IEEE 35th Annual*. IEEE, 2004. p. 2050-2053. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org.ez338.periodicos.capes.gov.br/stamp/stamp.jsp?arnumber=1355433>>. Acesso em: 24 jun.2017.

PETRUZZIELLO, F.; ZIOGAS, P. D.; JOOS, G. A novel approach to paralleling of power converter units with true redundancy. *Power Electronics Specialists Conference, 1990. PESC'90 Record., 21st Annual IEEE*. IEEE, 1990. p. 808-813. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org.ez338.periodicos.capes.gov.br/stamp/stamp.jsp?arnumber=131272>>. Acesso em: 24 jun.2017.

PRODANOVIC, M.; GREEN, T. C.; MANSIR, H. A survey of control methods for three-phase inverters in parallel connection. *Power Electronics and Variable Speed Drives, 2000. Eighth International Conference on (IEE Conf. Publ. n. 475)*. IET, 2000. p. 472-477. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org.ez338.periodicos.capes.gov.br/stamp/stamp.jsp?arnumber=888971>>. Acesso em: 24 jun.2017.

RACHID, M. H. *Eletrônica de potência: circuitos dispositivos e aplicações*. Tradução: Carlos Alberto Favato. São Paulo: Makron Books, 1999. Cap.10, p. 436. ISBN 85-346-0598-X.

SHANXU, D. *et al.* Parallel operation control technique of voltage source inverters in UPS. *Power Electronics and Drive Systems, 1999. PEDS'99. Proceedings of the IEEE 1999 International Conference on*. IEEE, 1999. p. 883-887. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org.ez338.periodicos.capes.gov.br/stamp/stamp.jsp?arnumber=792823>>. Acesso em: 24 jun.2017.

SUN, X.; LEE, Y.; XU, D. Modeling, analysis, and implementation of parallel multi-inverter systems with instantaneous average-current-sharing scheme. *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 18, n. 3, p. 844-856, 2003. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org.ez338.periodicos.capes.gov.br/stamp/stamp.jsp?arnumber=1198064>>. Acesso em: 24 jun.2017.

TAN, J. *et al.* A novel load sharing control technique for paralleled inverters. *Power Electronics Specialist Conference, 2003. PESC'03. 2003 IEEE 34th Annual*. IEEE, 2003. p. 1432-1437. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org.ez338.periodicos.capes.gov.br/stamp/stamp.jsp?arnumber=1216797>>. Acesso em: 24 jun.2017.

TULADHAR, A. *et al.* Control of parallel inverters in distributed AC power systems with consideration of line impedance effect. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 36, n. 1, p. 131-138, 2000. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org.ez338.periodicos.capes.gov.br/stamp/stamp.jsp?arnumber=821807>>. Acesso em: 24 jun.2017.

TULADHAR, A. *et al.* Parallel operation of single phase inverter modules with no control interconnections. *Applied Power Electronics Conference and Exposition, 1997. APEC'97 Conference Proceedings 1997., Twelfth Annual*. IEEE, 1997. p. 94-100. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org.ez338.periodicos.capes.gov.br/stamp/stamp.jsp?arnumber=581439>>. Acesso em: 24 jun.2017.

VANDOORN, T. L. *et al.* Review of primary control strategies for islanded microgrids with power-electronic interfaces. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 19, p. 613-628, 2013. Disponível em: <http://ac-els-cdn-com.ez338.periodicos.capes.gov.br/S1364032112006764/1-s2.0-S1364032112006764-main.pdf?_tid=8e3b8254-58f0-11e7-83a5-00000aab0f6b&acdnat=1498317766_58c2eefa95870b2e80511f058da4048c>. Acesso em: 24 jun.2017.

WU, T.; CHEN, Y.; HUANG, Y. 3C strategy for inverters in parallel operation achieving an equal current distribution. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 47, n. 2, p. 273-281, 2000. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org.ez338.periodicos.capes.gov.br/stamp/stamp.jsp?arnumber=836342>>. Acesso em: 24 jun.2017.

REVIEW OF CLASSICAL CONTROL STRATEGIES FOR PARALLEL OPERATED INVERTERS

ABSTRACT

For nearly 30 years, researchers have studied the parallelism of voltage inverters to increase the capacity and redundancy of systems in the most diverse areas. The increasing use of renewable energies has boosted recent research. However, this parallelism still presents great challenges to control due to the dynamics of the variables involved. Many techniques were developed on the theme, each with its peculiarities. This article reviews and classifies the proposals most used in this period, which are the basis of the most current solutions. These methods range from the use of a central controller, to the use of autonomous modules, and the use or not of communication between the elements of the system. The operating principle, structure, advantages and disadvantages of each of these strategies are exposed. And finally, considerations are presented on the choice of the most appropriate technique according to the application.

Keywords: Voltage inverters. Parallelism. Control strategies. Redundancy.

Envio: julho/2017

Aceito para publicação: julho/2017