

SINCRONIZAÇÃO DE MICRORREDES EM MALHA ABERTA BASEADA NO MÉTODO DE INSERÇÃO DE IMPEDÂNCIAS

WAGNER S. HOKAMA, TIAGO R. RICCIARDI, WALMIR FREITAS

*Departamento de Sistemas e Energia, Faculdade de Eng. Elétrica e Computação, Universidade Estadual de Campinas
Av. Albert Einstein, 400, Cidade Universitária 'Zeferino Vaz', 13083-852, Campinas, SP, Brasil
E-mails: whokama@cpfl.com.br, tiago@dsee.fee.unicamp.br, walmir@dsee.fee.unicamp.br*

Abstract — A common procedure in the microgrids operation consists in their synchronization or reconnection to the main grid, when the microgrid changes from the stand-alone to the grid-connected operation mode. Traditionally, this synchronization procedure is done by a closed-loop feedback acting on the microgrid generators automatic control system until the voltage over the reconnection element be reduced to a level that the electromagnetic and electromechanical transients observed are not dangerous to the related equipment. However, the closed-loop methods present the disadvantage of the need for remote communication infrastructure between the connection point and the generators. This paper discusses an alternative approach, consisting in making the open-loop synchronization possible by reducing the transient level through the inclusion of a series impedance in the reconnection element. The methodology for the evaluation of such impedance is presented and later verified in a case study. The computational simulations result show that the method is effective because allows the microgrid to the main grid synchronization in the test system investigated for all the practical possible operation conditions.

Keywords — Microgrids, synchronization, power systems dynamics, open-loop control, transients.

Resumo — Uma manobra comum na operação de microrredes consiste na sincronização ou reconexão ao sistema principal, quando a microrrede muda do modo de operação ilhado para o modo de operação em paralelo. Tradicionalmente, tal procedimento é feito via realimentação em malha fechada, que atua no controle automático dos geradores da microrrede até que a tensão sobre o elemento de reconexão seja reduzida a ponto que os transitórios observados não sejam danosos aos equipamentos envolvidos. Tais métodos, todavia, apresentam desvantagens por necessitarem de infraestrutura de comunicação entre o ponto de reconexão e os geradores, o que aumenta a complexidade particularmente em microrredes compostas por múltiplos geradores. Neste artigo é discutido um método alternativo, que consiste em propiciar a sincronização em malha aberta baseada na redução nos níveis de transitórios causada pela inclusão de uma impedância em série com o elemento de reconexão. A metodologia para determinação do valor de impedância necessário é apresentada e posteriormente verificada através de um estudo de caso. Os resultados de simulações computacionais obtidos sugerem que o método é eficaz, pois permite que a microrrede seja sincronizada à rede principal no sistema teste investigado para todo o espaço de pontos de operação prática possíveis.

Palavras-chave — Microrredes, sincronização, dinâmica de sistemas de energia elétrica, controle em malha aberta, transitórios.

1 Introdução

A busca por melhoria na confiabilidade do suprimento aliada às questões ambientais e à necessidade de maior flexibilidade no planejamento e na operação dos sistemas de distribuição de energia elétrica têm impulsionado o surgimento e o desenvolvimento das microrredes (em inglês, *microgrids*). Microrredes são sistemas elétricos em pequena escala, projetadas para o suprimento local de energia, capazes de, operando de modo independente da concessionária de distribuição local, suprir pequenas comunidades como condomínios, edifícios, campus universitários, plantas industriais, etc. (Hatziaargyriou et al. 2014) e (Chowdhury et al. 2009).

Microrredes podem operar conectadas ou ilhadas do sistema-tronco da concessionária local. Tendo em vista tal flexibilidade de operação, ora em paralelo ao, ora ilhada do sistema principal, uma manobra comumente realizada e extremamente importante no contexto da operação de microrredes consiste na reconexão (ressincronização) de tais sistemas à rede principal da concessionária. Esse procedimento, que consiste na mudança do modo de operação da microrrede de *ilhado* para *em paralelo* deve ser feito de modo que os transitórios eletromagnéticos e eletromecânicos experimentados pelos diversos equipamentos envolvidos sejam os mais suaves possíveis, a fim de resguardar sua segurança e integridade. O processo de reconexão das microrredes é ainda mais desafiador quando feito em condições de emergência.

Tradicionalmente, a reconexão de sistemas ilhados como as microrredes ao sistema-tronco local das concessionárias é feita de dois modos. A primeira alternativa consiste em desconectar todas as fontes da microrrede, reconectar a microrrede ao sistema local e, então, ressincronizar as fontes uma a uma. Essa alternativa, porém, elimina uma das principais potencialidades que emergem da operação em microrredes, a de manter o suprimento das cargas locais quando, por qualquer razão, o sistema principal não é capaz de atendê-las. Para evitar que as cargas locais sejam, ainda que temporariamente, desabastecidas, a segunda alternativa de reconexão de microrredes consiste na atuação dos controles dos geradores locais para que a diferença de tensão no ponto de conexão entre a microrrede e o sistema principal seja mínima, de forma que os transitórios de reconexão observados não sejam um problema.

As abordagens tradicionalmente empregadas para sincronização de sistemas ilhados ao sistema da concessionária local empregam, invariavelmente, alguma forma de controle em malha fechada que realimenta as medidas de diferença de tensão entre os dois sistemas no controle automático dos geradores da microrrede (Assis & Taranto 2012) e (Cho et al. 2011). O principal desafio presente em tais abordagens, todavia, é relativo ao fechamento da malha de controle via canal de comunicação entre o ponto de conexão entre os dois sistemas e os geradores locais da microrrede. Esse aspecto torna tal abordagem ainda mais desafiadora num contexto de ressincroni-

zação em emergência ou que envolva múltiplos geradores locais na microrrede.

Recentemente, um método que contorna tais dificuldades ao propiciar que a reconexão seja feita em malha aberta foi proposto (Zhou 2016). A sincronização em malha aberta explora a redução nos transitórios de sincronização propiciada pela inclusão de uma impedância em série com o elemento de reconexão (chave, disjuntor, etc.) para relaxar as condições de tensão sobre tal elemento. Projetando-se uma impedância que relaxe tais condições de modo a cobrir todo o espaço de pontos de operação possíveis, não há mais a necessidade da malha fechada que atue no controle dos geradores da microrrede para reduzir a tensão sobre o elemento de conexão.

Este artigo apresenta uma metodologia que permite avaliar como uma determinada impedância pode flexibilizar as condições operacionais da microrrede de tal forma que a reconexão possa ser feita em malha aberta. Simulações computacionais de transitórios eletromecânicos e eletromagnéticos de sincronização de um sistema teste em malha aberta através da inserção de impedância são apresentadas.

O artigo segue organizado da seguinte forma. A seção 2 discute a sincronização de microrredes ao sistema tronco e apresenta os fundamentos teóricos da sincronização em malha aberta através da inserção de impedância. A metodologia para avaliação da sincronização em malha aberta via inserção de impedância é apresentada na seção 3. Um estudo de caso da metodologia é então apresentado na seção 4 ao passo que as principais conclusões obtidas neste trabalho são apresentadas na seção 5.

2 Sincronização de Microrredes

Nesta seção serão discutidas algumas particularidades da operação de microrredes, em especial os desafios associados a sincronização à rede da concessionária local.

2.1 Operação das Microrredes

Enquanto a microrrede opera conectada ao sistema principal da concessionária local, diz-se que operam em *modo conectado à rede* ou em *paralelo*. Se, por um motivo qualquer, a microrrede separa-se do sistema principal, porém permanece em operação suprindo suas cargas locais, diz-se que a microrrede opera-se em *modo ilhado*. A transição entre ambos os modos exige uma série de alterações nos esquemas de controle e proteção da rede, a fim de que os padrões de qualidade de energia elétrica sejam mantidos aos consumidores independentemente do modo de operação.

2.2 Sincronização de Microrredes ao Sistema da Concessionária Local

A passagem do modo de operação *ilhado* para o modo de operação *conectado à rede* é denominada sincronização da microrrede. Tal manobra é de extrema relevância e, se não for adequadamente reali-

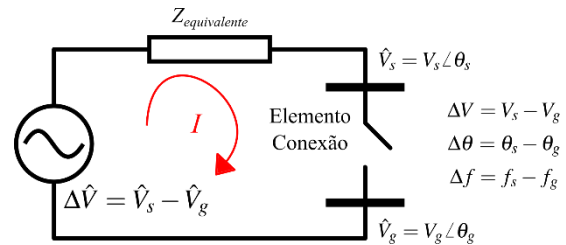


Figura 1. Esquema simplificado de sincronização baseado no equivalente de curto circuito.

zada, pode resultar em danos a máquinas rotativas tais como queima de enrolamentos e fratura do eixo.

O transitório de sincronização é semelhante ao transitório de curto-circuito. A tensão de curto-circuito pode ser comparada com a tensão entre os terminais do disjuntor que conecta a microrrede ao sistema principal; a impedância de curto-circuito pode ser comparada com a soma das impedâncias equivalentes das duas barras a serem sincronizadas e a corrente de sincronização é análoga à corrente de curto-circuito. O circuito elétrico equivalente que permite a obtenção da corrente de curto/sincronização é apresentado na Figura 1.

Sabe-se, da teoria de curto-circuito, que o pico da corrente transitória é diretamente proporcional a tensão e inversamente proporcional a impedância equivalente vista do ponto de aplicação da falta (Sato & Freitas 2015). Tal relação é expressa na Equação (1):

$$I_{peak} \propto \frac{|\bar{V}_{CC}|}{|Z_{CC}|} \quad (1)$$

Há duas formas de reduzir a corrente de curto-circuito (analogamente, a de sincronização da microrrede) na Equação (1). A primeira consiste em reduzir o valor da fonte de tensão equivalente. Essa é a ideia por trás dos métodos de sincronização em malha fechada. A segunda forma consiste em aumentar a impedância equivalente. Tal ideia é a base do método de sincronização em malha aberta via inserção de impedância explorado neste trabalho.

Na abordagem tradicional, para reduzir a tensão entre os terminais do disjuntor de sincronismo, é preciso reduzir a diferença de tensão, ângulo e fase entre as duas barras a serem sincronizadas. Esse procedimento pode ser feito manualmente, através de operador, ou ainda através de equipamentos de proteção e controle digital que realizam o procedimento automaticamente, atuando nos reguladores de tensão (RT) e de velocidade (RV) de geradores síncronos, comandando o fechamento do disjuntor de paralelismo quando as condições observadas pelo relé de verificação de sincronismo (ANSI 25) forem adequadamente satisfeitas (Bernardes 2013). Essa solução tem sido historicamente utilizada para sincronização do tipo gerador-sistema, na qual a proximidade entre os controles locais das máquinas e o disjuntor de paralelismo não exige sofisticada infraestrutura de comunicação. No caso de microrredes, todavia, o controle em malha fechada no qual os pontos de

monitoramento e atuação podem estar quilômetros de distância um do outro apresenta mais desafios.

2.3 Sincronização de Microrredes em Malha Aberta através da Utilização de Impedância

A outra possibilidade de reduzir o transitório de sincronização apresentado na Equação (1) consiste em aumentar provisoriamente o valor da impedância equivalente. A possibilidade de atenuar o nível de transitórios a partir do aumento da impedância permite que as condições da tensão equivalente sobre o disjuntor de paralelismo sejam relaxadas. Aumentar o valor da impedância equivalente permite, portanto, que a sincronização produza níveis de transitório equivalentes aos que seriam produzidos na sincronização em malha fechada tradicionalmente feita mesmo que as condições de tensão sobre o disjuntor estejam além do que normalmente é adotado pelo relé de verificação de sincronismo.

No caso limite, se houver um valor de impedância que, para todos os cenários normais de operação possíveis de tensão no lado do sistema tronco e no lado da microrrede, o transitório resultante for no máximo aquele observado no controle em malha fechada com os ajustes habituais do relé de verificação de sincronismo, então a conexão da microrrede ao tronco principal pode ser feita em malha aberta, sem a necessidade da infraestrutura de comunicação entre o gerador e o disjuntor.

A ideia de utilizar uma impedância para a redução do transitório de sincronização encontra paralelos em aplicações semelhantes para atenuação de transitórios de chaveamento de capacitores, de partida de motores de indução e de energização de transformadores de potência. No caso da sincronização de microrredes, além dos benefícios decorrentes da possibilidade de relaxar as condições de tensão pré-fechamento, o transitório de *bypass* e a estabilidade de ângulo (transitória) das máquinas são questões que devem ser analisadas para que a sincronização em malha aberta seja viável.

Na próxima seção, a metodologia proposta para avaliação do impacto da utilização de uma impedância de pré-inserção para a sincronização de uma microrrede ao sistema tronco da concessionária será apresentada.

3 Metodologia

Nesta seção é apresentada a metodologia para avaliação da sincronização em malha aberta baseada na inserção de impedância.

3.1 Determinação dos Níveis Transitórios de Referência

O primeiro passo consiste em obter o valor de referência de transitório. O valor de referência é o valor observado quando a prática corrente, isto é, baseada na sincronização em malha fechada, é adotada para sincronização da microrrede. Os valores de referência do transitório de sincronização podem ser obtidos através de simulações computacionais de

transitórios eletromagnéticos ou ainda através de métodos analíticos com algumas simplificações para casos mais simples.

Para determinação do caso de referência, a simulação do fechamento do disjuntor de paralelismo deve ser feita utilizando-se os critérios adotados para ajuste do relé de verificação de sincronismo do sistema analisado. Tais valores podem ser estabelecidos por concessionárias ou ainda através de normas técnicas (IEEE Std C50.12 2006; IEEE Std C50.13 2014; IEEE Std 1547.2 2009). O valor de referência de transitórios é importante pois serve como guia no processo de determinação da impedância necessária para sincronização em malha aberta. O valor de impedância proposto deve ser tal que os transitórios observados na sincronização em malha aberta não superem os valores de referência, ainda que eventualmente o gerador suporte valores maiores.

3.2 Projeto da Impedância de Sincronização em Malha Aberta Através de Simulações Computacionais

A metodologia para determinação do valor de impedância necessário para relaxamento das restrições de sincronização no espaço ΔV , $\Delta \theta$, Δf consiste na repetição de simulações do tipo *EMTP* em múltiplos cenários de sincronização da microrrede. Cada cenário consiste de um valor de ΔV , $\Delta \theta$, Δf , $Z_{INSERTED}$. Para cada cenário, os valores dos transitórios de sincronização obtidos via simulação *EMTP* devem ser comparados com o valor de referência até que, para cada valor de impedância simulado, a região para a qual os parâmetros ΔV , $\Delta \theta$, Δf possam ser relaxados seja obtida.

Uma vez obtida as regiões de relaxamento dos parâmetros ΔV , $\Delta \theta$, Δf , o valor de impedância necessário para sincronização em malha aberta é aquele para o qual a região de relaxamento dos parâmetros ΔV , $\Delta \theta$, Δf seja expandida até os limites de operação factíveis. Para as simulações do tipo *EMTP* o modelo adotado para representação da máquina síncrona é o modelo subtransitório de dois eixos (Kundur 1994).

4 Estudo de Caso

Nesta seção apresentaremos um estudo de caso numérico da sincronização de uma microrrede ao sistema principal em malha aberta através do método de inserção de impedância discutido na metodologia apresentada na seção anterior. Os resultados de simulação foram obtidos com o *software* SimPowerSystems™/MATLAB.

4.1 Sistema Teste

Na Figura 2 apresentamos o sistema teste utilizado neste estudo de caso. O sistema teste é composto por: Rede Principal – trata-se da rede da concessionária local a qual a microrrede será sincronizada, representada pelo seu equivalente Thévenin; DJ1 – disjuntor responsável por conectar a microrrede a rede principal através da impedância; DJ2 – disjuntor de *bypass* da impedância após a sincronização;

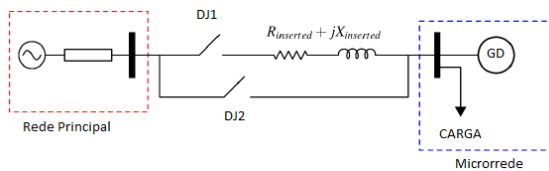


Figura 2. Sistema teste para o estudo de caso.

$R_{INSERTED} + jX_{INSERTED}$ – impedância inserida para redução do transitório de sincronização em malha aberta; **Microrrede** – microrrede que será sincronizada a rede principal; **GD** – gerador distribuído da microrrede, que no caso deste sistema teste é um gerador síncrono; **Carga** – carga local da microrrede.

O valor numérico dos parâmetros do sistema teste utilizados nas simulações do estudo de caso são apresentados nas Tabelas 1 a 3.

4.2 Caso de Referência para Sincronismo

As condições de sincronização em malha fechada são apresentadas na Tabela 4, de acordo com a norma recomendada pelo IEEE (IEEE Std C50.12 2006). De acordo com o recomendado nessa norma, o controle do gerador atuará em malha fechada até que: a tensão no lado relativo à microrrede seja, no máximo, 5% maior do que a tensão no lado relativo a rede principal; a diferença no ângulo de tensão seja de 10° e a diferença de frequência seja de 0,067 Hz. Os valores apresentados na Tabela 4 representam tais condições e são as condições iniciais do sistema teste no instante imediatamente anterior a sincronização da microrrede.

4.3 Valores de Referência de Transitório de Sincronização

O transitório de sincronização do sistema teste descrito na subseção 4.1 com os critérios apresentados na subseção 4.2 é apresentado na Figura 3 e na Tabela 5. Estes valores, obtidos quando a sincronização é feita com o que é recomendado pela norma, representam o transitório máximo aceitável que o gerador local da microrrede pode ser submetido em condições normais de sincronização. Valores superiores aos obtidos nesta subseção podem resultar em danos a tais equipamentos. Para que a sincronização em malha aberta seja viável, portanto, os transitórios decorrentes não podem superar os valores obtidos nesta subseção. Ressalta-se que, como essa simulação é realizada para obtenção dos valores de referência, a impedância de sincronização apresentada na Figura 2 é nula para este caso.

4.4 Impacto da Inserção da Impedância na Redução dos Transitórios de Sincronismo

Os resultados apresentados na Figura 4 e na Tabela 6 visam demonstrar que o uso da impedância é capaz de reduzir os transitórios de sincronização. Nessas simulações, os valores de diferença de tensão, frequência e fase da simulação do caso de referência foram mantidos, porém adotando-se um valor de 5Ω para a impedância $Z_{INSERTED}$. A relação X/R adotada é a mesma do equivalente (X/R = 7,9285).

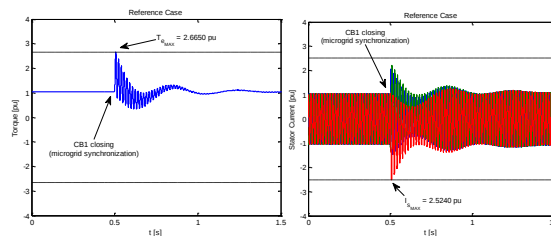


Figura 3. Forma de onda do torque e da corrente do gerador síncrono da microrrede para o caso de referência.

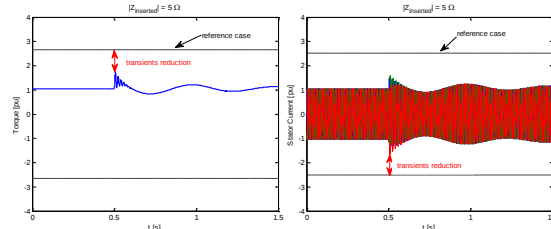


Figura 4. Forma de onda do torque e da corrente do gerador síncrono da microrrede para o caso com $|Z_{INSERTED}| = 5\Omega$.

Tabela 1. Parâmetros do equivalente no sistema teste.

Parâmetros	Valores
V_S	$1,0 \angle 0_{SUB}$ pu
V_{RMS} ph-ph	13,8 kV
Nível de Curto Circuito	1.000 MVA
X/R	7,9285
Impedância de Curto Circuito	$0,0238 + j0,1889 \Omega$

Tabela 2. Parâmetros da carga local da microrrede.

Parâmetros	Valores
S_{LOAD}	$A \times S_{Microrrede}$
Fator de Potência	0,95 (indutivo)
V_{RMS} ph-ph	13,8 kV
Modelo de Carga	Impedância Constante

Tabela 3. Parâmetros do gerador síncrono da microrrede.

Parâmetros	Valores	Parâmetros	Valores
V_{RMS} ph-ph	13,8 kV	H	2,0 s
F_n	60 Hz	par polos	2 unidades
R_s	0,004 pu	AVR	IEEE Tipo 1
X_d	2,066 pu	T_r	22 ms
X_d'	0,259 pu	K_a	400
X_d''	0,213 pu	T_a	50 ms
X_q	1,044 pu	K_e	1
X_q''	0,207 pu	T_e	1,2 s
X_l	0,050 pu	K_f	0,03
T'_{do}	4,485 s	T_f	0,6 s
T''_{do}	0,068 s	E_{fmin}	-5
T'''_{do}	0,1 s	E_{fmax}	8

Tabela 4. Condições utilizadas na simulação do caso de referência.

Parâmetros	Microrrede	Rede Principal
Tensão (magnitude)	1,05 pu	1,00 pu
Tensão (fase)	0°	-10°
Frequência	60,067 Hz	60,0 Hz

Tabela 5. Valores dos transitórios para o caso de referência.

Parâmetros	Valores
Torque	2,6650 pu
Corrente do Estator	2,5240 pu

Tabela 6. Valores dos transitórios para o caso de referência (0Ω) e para o caso de sincronização através de impedância de 5Ω.

Parâmetros	Valores	
	$Z_{INSERTED} = 0\Omega$	$Z_{INSERTED} = 5\Omega$
Torque	2,6650 pu	1,7301 pu
Corrente do Estator	2,5240 pu	1,6762 pu

4.5 Determinação da Impedância Necessária para Sincronização em Malha Aberta

Seguindo-se a metodologia descrita na subseção 3.2 para o estudo de caso, o pico da corrente transitória do estator do gerador da microrrede foi obtido via repetidas simulações computacionais tipo *EMTP* para diferentes cenários de operação envolvendo variações da magnitude e do ângulo de tensão da microrrede e de valores de impedância de sincronização. Os resultados são apresentados nas Figuras 5 e 6, onde para $Z_{INSERTED}$ foram testados os valores de 0, 5, 15, 25 e 40Ω considerando-se cenários de sincronização para os quais a diferença ΔV sobre o disjuntor DJ1 varia entre $\pm 10\%$ e a diferença $\Delta\theta$ varia entre $\pm 180^\circ$.

Para o caso em que $Z_{INSERTED} = 25\Omega$, as condições de $\Delta\theta$ podem ser relaxadas até cerca de $\pm 150^\circ$, porém se a impedância for elevada para 40Ω os valores de $\Delta\theta$ podem ser relaxados em todo o espaço possível (-180 a $+180^\circ$), considerando-se que tanto a microrrede quanto o sistema tronco podem operar com tensões entre 0,9 e 1,1 pu. Do ponto de vista de redução do transitório de sincronização, portanto, uma impedância de 40Ω seria capaz de propiciar a sincronização em malha aberta. Nas simulações apresentadas a frequência foi mantida no seu valor nominal em ambos os sistemas a serem sincronizados. As pequenas oscilações aceitáveis no valor da frequência de operação não apresentam grande impacto no valor de pico do torque e da corrente transitórias.

Dos resultados obtidos pode-se verificar que os transitórios de sincronização são mais sensíveis as variações de $\Delta\theta$ do que de ΔV . Na Figura 7 os resultados para o caso em que $\Delta V=0$ são apresentados na superfície no espaço $\Delta\theta \times Z_{INSERTED} \times$ pico de torque ou corrente no estator. As projeções desta superfície nos planos torque ou corrente $\times \Delta\theta$ e $\Delta\theta \times Z_{INSERTED}$ são apresentadas nas Figuras 8 e 9. Dos resultados apresentados na Figura 9 conclui-se que uma impedância de cerca de 30Ω é o mínimo necessário para que a sincronização em malha aberta não apresente transitórios acima dos valores de referência.

4.6 Investigação de Estabilidade e de Bypass

Embora a inserção da impedância possa reduzir os transitórios de sincronização, propiciando operação em malha aberta, sua inclusão pode criar problemas do ponto de vista de estabilidade. Na Figura 10 é apresentado o comportamento transitório do ângulo do gerador da microrrede no intervalo de tempo que segue o fechamento do disjuntor DJ1 no instante $t = 0,5$ s, para diferentes valores de impedância e para uma abertura angular extrema do ponto de vista de estabilidade, $\Delta\theta = 150^\circ$. Para valores de $Z_{INSERTED}$ menores que 5Ω a operação é estável, porém como visto anteriormente os transitórios observados superam os valores de referência. Para os valores de $Z_{INSERTED}$ necessários para reduzir os transitórios aos valores de referência, por volta de 30Ω , a sincronização é instável, porém se o valor da impedância continuar sendo aumentado, a operação volta a ser estável novamente.

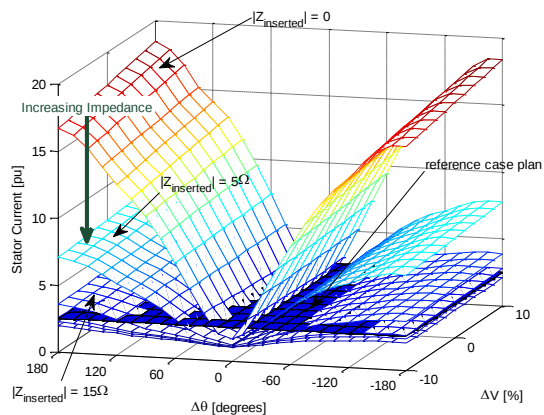


Figura 5. Resultado em 3D das simulações de transitório de sincronização da microrrede para diferentes cenários de operação e impedância de sincronização $Z_{INSERTED}$.

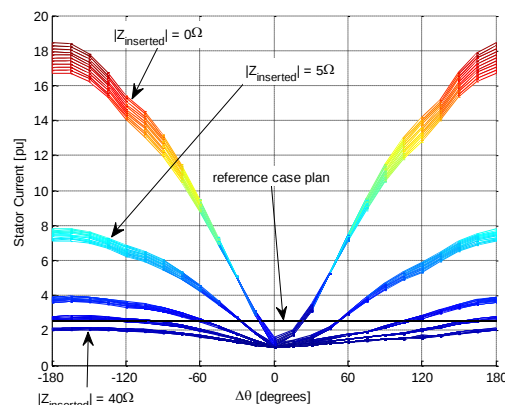


Figura 6. Projeção dos resultados da Figura 5 no plano corrente do estator $\times$ abertura angular da microrrede.

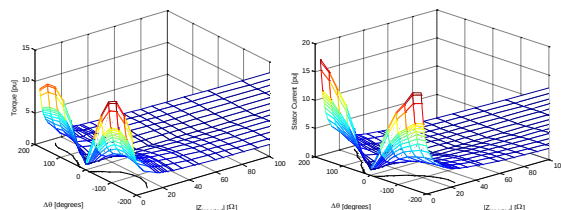


Figura 7. Resultado em 3D das simulações de transitórios para vários valores de impedância $Z_{INSERTED}$, mantendo-se $\Delta V=0$.

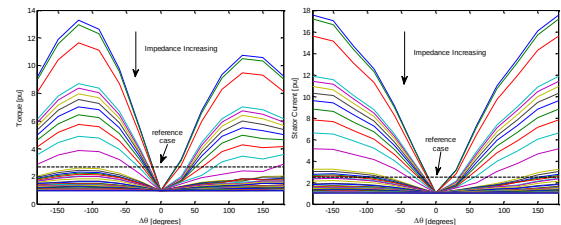


Figura 8. Projeção dos resultados da Figura 7 nos planos torque e corrente do estator $\times$ abertura angular da microrrede

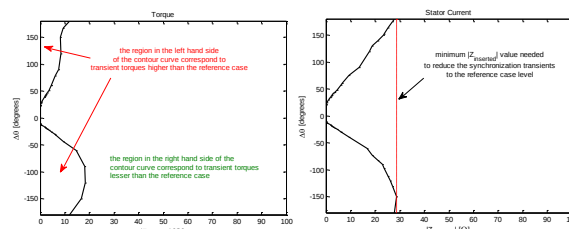


Figura 9. Curvas de nível das superfícies apresentadas na Figura 7 representando os valores de referência do transitório de sincronização.

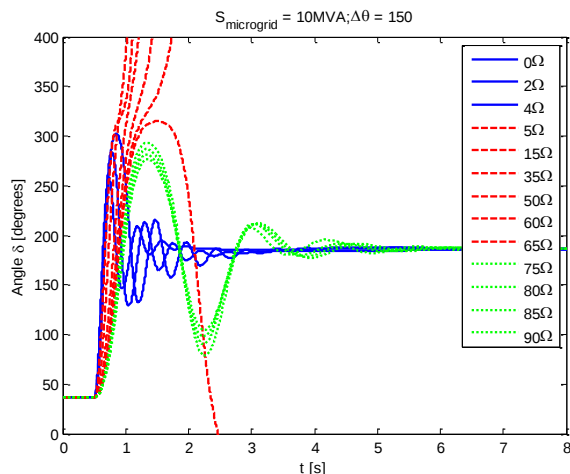


Figura 10. Análise de estabilidade para diferentes valores de impedância $Z_{INSERTED}$.

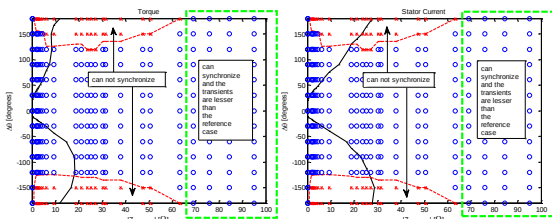


Figura 11. Análise de estabilidade para diferentes condições de $\Delta\theta$ e de $Z_{INSERTED}$.

A estabilidade da operação de sincronização via impedância foi investigada para diversos pontos de operação no espaço $\Delta\theta \times Z_{INSERTED}$ apresentado anteriormente na Figura 9 e os resultados obtidos são apresentados na Figura 11. Os casos correspondentes a operação estável são representados por um marcador azul $\circ$ ao passo que os casos instáveis são representados por um marcador vermelho $\times$. Observe que, para $|Z_{INSERTED}| = 75\Omega$, é possível sincronizar a microrrede de forma estável, com transitórios menores que os valores de referência, para todos os pontos de operação práticos no espaço $\Delta V, \Delta\theta$.

O transitório de *bypass* da impedância de sincronização de 75Ω é apresentado na Figura 12. Os valores obtidos para o segundo transitório são menores do que os obtidos no primeiro transitório, portanto o *bypass* da impedância é também menor do que o valor de referência. Do ponto de vista dinâmico, o *bypass* de $Z_{INSERTED}$ é estável como pode ser observado pelo comportamento do ângulo e da velocidade do gerador síncrono da microrrede.

5 Conclusão

Este artigo apresentou uma metodologia para avaliação do potencial de flexibilização das condições de sincronização de microrredes em sistemas de distribuição através da utilização de impedâncias de pré-inserção. A flexibilização de tais condições potencialmente viabiliza a sincronização de microrredes em malha aberta. Os resultados obtidos no estudo de caso sugerem que a utilização da impedância de sincronização viabiliza tecnicamente a sincronização de uma microrrede simples ao sistema tronco da concessionária em malha aberta. Sem a necessidade de comunicação ponto-a-ponto entre disjuntor de

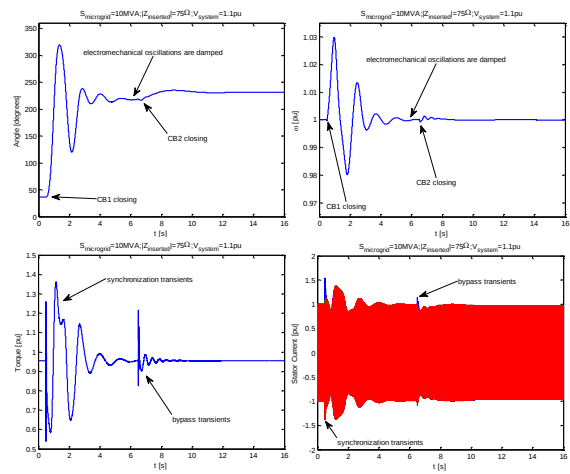


Figura 12. Análise do transitório de *bypass*.

paralelismo e o controle dos geradores que viabilize a sincronização da microrrede, o potencial de aplicação da sincronização em malha aberta via inserção de impedância é particularmente atraente para os casos em que a microrrede comporta um grande número de pequenos geradores, como por exemplo casos com geradores solares fotovoltaicos residenciais, o que pode ser investigado em trabalhos futuros.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio da CPFL Energia e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

Referências Bibliográficas

- Assis, T.M.L. & Taranto, G.N., 2012. Automatic Reconnection From Intentional Islanding Based on Remote Sensing of Voltage and Frequency Signals. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 3(4), pp.1877–1884.
- Bernardes, R., 2013. Sincronização Automática de Geradores.
- Cho, C. et al., 2011. Active Synchronizing Control of a Microgrid. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 26(12), pp.3707–3719.
- Chowdhury, S., Chowdhury, S.P. & Crossley, P., 2009. *Microgrids and Active Distribution Networks*, London: The Institution of Engineering and Technology.
- Hatziaargyriou, N. et al., 2014. *Microgrids: Architectures and Control*, John Wiley and Sons Ltd-IEEE Press.
- IEEE Std 1547.2, 2009. IEEE Std 1547.2-2008. *IEEE Std 1547.2-2008*, pp.1–217.
- IEEE Std C50.12, 2006. IEEE Std C50.12-2005 (Previously designated as ANSI C50.12-1982). *IEEE Std C50.12-2005*, pp.1–45.
- IEEE Std C50.13, 2014. IEEE Standard for Cylindrical-Rotor 50 Hz and 60 Hz Synchronous Generators Rated 10 MVA and Above. , pp.1–63.
- Kundur, P., 1994. *Power System Stability and Control*, McGraw-Hill.
- Sato, F. & Freitas, W., 2015. *Análise de Curto-Circuito e Princípios de Proteção em Sistemas de Energia Elétrica Fundamentos e Prática*, Campus Elsevier.
- Zhou, Y., 2016. *Methods to Enable Open-Loop Synchronization For Islanded Systems*. University of Alberta.