

ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TENSÃO EM BARRAMENTOS DE MICRORREDES CC INSTALADOS EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO FOTOVOLTAICOS

ALLISON A. DE OLIVEIRA, EDUARDO M. VICENTE, PAULA DOS S. VICENTE, VALCERES V. R. E SILVA,
FERNANDO L. TOFOLI

Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de São João del-Rei

Praça Frei Orlando, 170 – Centro – São João del-Rei–MG – CEP 36307-352

*E-mails: allison_alti@yahoo.com.br, eduardomoreira@ufsj.edu.br, paulasantos@ufsj.edu.br,
vrsvilva@ufsj.edu.br, fernandolessa@ufsj.edu.br*

Abstract— This work is dedicated to the study and analysis of standard voltage stability of the dc link that exists in a low-voltage photovoltaic (PV) microgrid. The microgrid consists of PV modules, loads, and power electronic converters that are responsible for transferring energy from one point to another, which can be the source, dc link or loads. The methods used to analyze stability aim at reducing the disturbance injected into the microgrid due to voltage fluctuations and variation of load power consumption, while reliability and autonomy PV-based microgrids can be achieved. Simulations are implemented in PSIM® to evaluate the control system robustness and validate the effectiveness of the standard stability criteria when the load connected to the microgrid comes to vary.

Keywords— Stability analysis, renewable energy sources, photovoltaic solar energy, dc microgrids, virtual reactance.

Resumo— Este trabalho dedica-se ao estudo e a análise dos critérios de estabilidade da tensão do barramento CC de uma microrrede fotovoltaica de baixa tensão. A microrrede é constituída por módulos fotovoltaicos, cargas e conversores estáticos, que por sua vez são responsáveis por transferir a energia de um ponto a outro, que pode ser a fonte, o barramento CC ou as cargas. Os métodos empregados para a análise da estabilidade visam reduzir os distúrbios injetados na microrrede devido às oscilações de tensão e a variação do consumo de potência da carga. Tal estrutura visa elevar a confiabilidade e autonomia da microrrede CC como um todo. As simulações são implementadas no aplicativo PSIM® a fim de avaliar a robustez do sistema de controle e validar o desempenho dos critérios de estabilidade perante mudanças em parâmetros relacionados à carga conectada à microrrede CC.

Palavras-chave— Análise de estabilidade, fontes de energia renovável, energia solar fotovoltaica, microrrede CC, reatância virtual.

1 Introdução

Atualmente, um novo conceito envolvendo sistemas elétricos de potência tem ganhado espaço. Em vez de uma estrutura de geração centralizada, há a possibilidade de uma estrutura mais flexível denominada geração distribuída (GD). As microrredes CC se mostram uma boa opção para compor a GD, uma vez que são capazes de integrar novas fontes de energias renováveis à rede elétrica e atender a demanda crescente de energia, seja de forma integrada ou isolada da rede de energia elétrica CA (Balog, 2006).

Dentre as diversas fontes alternativas de energia, a energia solar fotovoltaica tem sido considerada uma excelente opção a ser instalada em microrredes CC, visto que se trata de uma forma de energia abundante, limpa e distribuída por toda superfície da Terra.

Desta forma, devido ao aumento na relevância no uso de microrredes alimentadas por fontes renováveis, este trabalho propõe modelos de análise de estabilidade baseados nos critérios de estabilidade de Routh-Hurwitz e no uso de elementos que emulem uma reatância virtual como forma de elevar a autonomia dos mesmos.

Para validar o desempenho dos critérios de estabilidade, a microrrede é submetida a duas variações. A primeira variação consiste na redução da tensão do barramento CC, como demonstração da variação da

irradiância solar nos painéis fotovoltaicos. A segunda análise envolve o aumento da potência consumida pela carga.

É importante solucionar os problemas decorrentes dessas duas perturbações, pois isso torna o sistema CC robusto, confiável e melhora a estabilidade de tensão, uma vez que este parâmetro intrinsecamente relacionado ao sistema CC implica diretamente o bom funcionamento da microrrede como um todo.

2 Critérios de Estabilidade

O conceito empregado na análise de estabilidade em sistema CC foi desenvolvido por Middlebrook e Cuk (1976), o qual posteriormente foi denominado critério de estabilidade de Middlebrook (1976). O intuito inicial dessa proposta era analisar como filtros de entrada afetavam a dinâmica de conversores estáticos realimentados (Middlebrook e Cuk, 1976). Logo, o objetivo não visava apenas à análise da estabilidade, mas sim assegurar que o filtro não afetasse as características dinâmicas do conversor em operação.

O critério de estabilidade de Middlebrook considera que o sistema CC seja formado por dois subsistemas. O primeiro subsistema, constituído principalmente por fontes de energia distintas, é conectado ao segundo subsistema, formado basicamente por cargas de naturezas diversas. A análise de estabilidade utilizando a impedância de saída das fontes e a impedân-

cia de entrada das cargas considera que ambos os subsistemas encontram-se isoladamente estáveis e estejam arranjados em cascata (Middlebrook e Cuk, 1976).

Desta forma, o critério de estabilidade discute como a interação entre dois subsistemas cascadeados pode afetar a estabilidade do sistema como um todo, definidos segundo a impedância de saída da fonte Z_f e a impedância de entrada da carga Z_c , conforme ilustra a Figura 1.

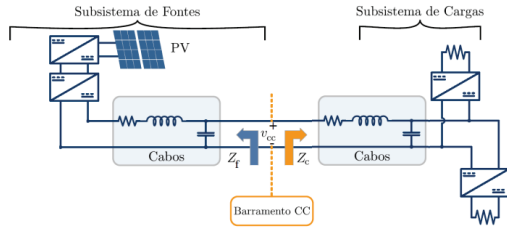


Figura 1. Microrrede CC genérica relacionando a impedância de saída das fontes e a impedância de entrada das cargas.

O circuito completo da Figura 1 pode ser representado de forma bem mais simplificada. Considerando que $F(s)$ é a representação da função de transferência da tensão de entrada e $G(s)$ é a função de transferência da tensão de saída, por sua vez relacionadas à fonte e à carga, respectivamente, a microrrede CC da Figura 1 corresponde à Figura 2.

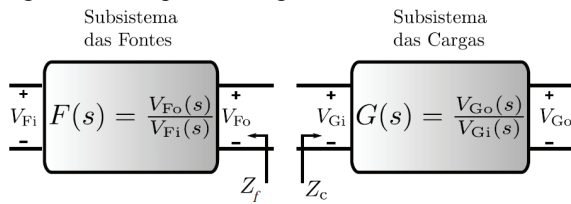


Figura 2. Acoplamento entre as funções de transferência das fontes e cargas.

A função de transferência geral do sistema, definida por $F_G(s)$, pode ser devidamente representada relacionando os ganhos de cada função de transferência e as impedâncias Z_f e Z_c segundo a equação (1).

$$F_G(s) = F(s) \cdot G(s) \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{Z_f}{Z_c}\right)} \quad (1)$$

O acoplamento mais desejado para este tipo de sistema CC ocorre quando o fator de carga, dado por $(1 + Z_f/Z_c)$, corresponde à unidade, o que pode ocorrer de duas formas: quando a impedância do subsistema de saída da fonte Z_f for nula ou se a impedância do subsistema de entrada da carga Z_c for infinita.

Como foi anteriormente mencionado, se cada subsistema for separadamente estável, logo a estabilidade dos subsistemas operando em conjunto depende exclusivamente da relação imposta pela razão Z_f/Z_c . Assim, a estabilidade do sistema pode ser diretamente obtida aplicando-se o critério de Nyquist a Z_f/Z_c (Middlebrook e Cuk, 1976), (Wildrick *et al.*, 1995).

Quando Middlebrook e Cuk (1976) propuseram um conceito baseado na análise de estabilidade de Nyquist, eventualmente isso resultou no desenvolvimento do critério de estabilidade para sistemas casca-

teados. A partir deste critério, é possível afirmar que a estabilidade do sistema será garantida em todo o espectro de frequências se a condição $Z_f < Z_c$ for satisfeita. Tal circunstância indica que a razão das impedâncias Z_f/Z_c será obrigatoriamente menor que a unidade, implicando que a margem de fase (*phase margin* – PM) será infinita e o contorno de Nyquist estará sempre localizado dentro do círculo unitário, sem jamais poder englobar o ponto (-1, 0) (Tahim *et al.*, 2012b).

De outra forma, também é possível utilizar o critério de estabilidade de Middlebrook baseando-se na margem de ganho (*gain margin* – GM). Quando se conhece a margem de ganho desejada e a impedância de entrada do subsistema da carga $|Z_c|$, pode-se projetar um subsistema de fontes que atenda tal restrição, simplesmente com base em (2).

$$\frac{|Z_f|}{|Z_c|} = \frac{1}{GM} \quad (2)$$

Dessa forma, a região proibida do critério de estabilidade de Middlebrook pode ser delimitada por um círculo cujo raio é determinado pela margem de ganho escolhida, como é mostrado na Figura 3. Nota-se que o círculo definido pela margem de ganho escolhida encontra-se dentro do círculo unitário e, se suas restrições forem respeitadas, o sistema atende as exigências necessárias para a estabilidade, isto é, $|Z_f(j\omega)| < |Z_c(j\omega)|$ (Karlsson, 2002), (Balog, 2006), (Schonberger, 2006).

É importante ressaltar que o critério de estabilidade de Middlebrook consiste em apenas uma condição, que é considerada suficiente para obter um sistema estável, mas não necessária. Outra questão importante sobre a aplicação do critério é a região no plano s na qual o contorno de Nyquist deve estar contido, a qual é muito reduzida (Balog, 2006). Por isso, vários outros critérios foram propostos partindo do princípio da relação entre as impedâncias e estabelecendo restrições menos severas e conservadoras quando comparadas ao critério de estabilidade de Middlebrook.

Por exemplo, Wildrick *et al.* (1995) estabeleceram o conceito de região proibida para o ganho da malha Z_f/Z_c , permitindo uma margem de fase de 60° e margem de ganho de 6 dB. Este critério também é conhecido como GMPM (*gain margin phase margin* – margem de ganho, margem de fase) e é menos restritivo, pois permite que o contorno de Nyquist extrapole os limites do círculo unitário, desde que atenda às exigências de PM e GM, como mostra a Figura 3.

É importante enfatizar que o funcionamento pleno das microrredes CC ocorre por meio do uso de conversores estáticos, capazes de adaptar os níveis de tensão adequados ao barramento CC, carga e demais dispositivos presentes no sistema. Contudo, em certas ocasiões os conversores apresentam um comportamento indesejado, justamente quando são conectadas cargas puramente resistivas e há algumas perturbações no sistema. O comportamento indesejado surge quando o sistema deixa de encarar o conversor como uma carga de potência constante (*constant power load* – CPL) e passa a vê-lo como uma carga de resistência negativa, cujo valor pode ser obtido a partir de (3).

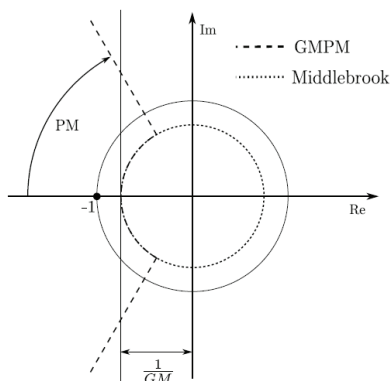


Figura 3. Limites dos critérios de estabilidade (GMPM e Middlebrook)

$$R_n = \frac{v_{bus}^2}{P} \quad (3)$$

em que P é a potência consumida pela CPL e v_{bus} é a tensão do barramento. Logo, os sistemas mais suscetíveis à instabilidade são aqueles cujo nível de tensão de barramento é baixo, alimentando cargas com alta potência. Em tais condições, a magnitude da impedância Z_c é reduzida e, conseqüentemente, torna-se suscetível à interferência oriunda da impedância Z_f , alterando assim o valor do fator de carga. Conclusivamente, isto demonstra como o valor do nível de tensão impacta diretamente na estabilidade do sistema (Tahim *et al.*, 2012b).

A estabilização da microrrede CC pode ser abordada por meio de dois tipos de soluções: passivas e ativas. Métodos passivos agregam elementos físicos visando alterar a relação de impedâncias do subsistema de fontes e cargas (Xing *et al.*, 2011), (Cespedes *et al.*, 2011). De acordo com os estudos realizados por Abe *et al.* (2006), é possível reduzir a magnitude do pico da impedância de saída da fonte Z_f apenas elevando o valor de C_{bus} , uma vez que, dependendo do valor da capacitância presente no barramento, o pico da impedância Z_f torna-se inversamente proporcional.

Portanto, uma forma de garantir a estabilidade do sistema em torno do ponto de operação envolve o aumento do valor da capacitância dos conversores associados às fontes (Karlsson, 2002), (Schonberger, 2006). Contudo, tal procedimento, apesar de elevar a margem de fase, apresenta a desvantagem de aumentar o valor da corrente de *inrush* e, portanto, aumentar a complexidade do sistema de proteção contra sobrecorrentes.

Desta forma, o método de análise de estabilidade utilizado no presente artigo explora o conceito dos métodos passivos. Utiliza-se também da análise linear para facilitar a compreensão da principal causa de instabilidade: conversores cascadeados, visto que, quando um sistema cascadeado sofre perturbações, o conversor no ponto de carga se apresenta como uma resistência negativa e, conseqüentemente, é encarado pelo sistema como uma fonte de instabilidade em malha aberta. Como forma de sanar este problema, são propostas duas soluções. A utilização do critério de Routh-Hurwitz para definir o valor de C_{bus} necessário

para controlar a instabilidade é uma possibilidade. Além disso, pode-se recorrer a uma reatância indutiva virtual que atue somente mediante as perturbações.

3 Metodologia

Para analisar a estabilidade de uma microrrede CC, foi modelado o sistema mostrado na Figura 4, composto por uma fonte de tensão, uma impedância e uma carga do tipo CPL (Sudhoff *et al.*, 2000), (Flower; Hodge, 2004).

Na Figura 4, r e L representam a resistência intrínseca e a indutância dos condutores que estão em série no barramento e C é a capacitância do barramento. Além disso, R_n é uma resistência que modela o efeito da carga, sendo usada para representar o comportamento da CPL. Os valores de cada elemento do circuito da Figura 4 estão disponibilizados na Tabela 1. Empregando esses valores, pode-se calcular o valor da resistência em plena carga como sendo $R_n=80 \Omega$.

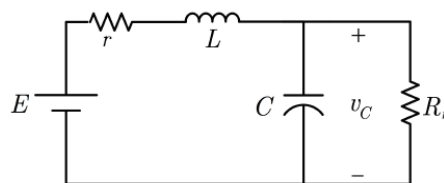


Figura 4. Circuito CC empregado na análise da estabilidade.

Tabela 1. Parâmetros do circuito CC.

Parâmetro	r (m Ω)	L (μ H)	E (V)	P (W)
Valor	70	100	400	2000

3.1 Critério de Estabilidade de Routh-Hurwitz

A análise de estabilidade baseada no critério de Routh-Hurwitz mostra-se interessante, pois, além de simples, fornece soluções bem coerentes (Sudhoff *et al.*, 2000), (Flower e Hodge, 2004). Uma desvantagem dessa abordagem está associada ao equacionamento do circuito quando o mesmo se torna mais complexo.

Considerando o circuito da Figura 4, pode-se estabelecer a seguinte relação no domínio s para a tensão nos terminais da carga:

$$v_c(s) = \frac{R_n \cdot E}{s^2(C \cdot L \cdot R_n) + s(C \cdot R_n \cdot r - L) + (R_n - r)} \quad (4)$$

Usando a equação (4), o arranjo de Routh pode ser descrito por:

$$\begin{array}{c|c} s^2 & C \cdot R \cdot L \\ s^1 & C \cdot R \cdot r - L \\ s^0 & (R - r) \end{array} \quad (5)$$

De acordo com o critério de Routh-Hurwitz, para que haja estabilidade no sistema, não podem ocorrer mudanças nos sinais dos elementos presentes na primeira coluna do arranjo de Routh. Então, uma vez que o termo $C \cdot R \cdot L$ é permanentemente positivo, então se

esperam que os termos $(C \cdot R \cdot r - L)$ e $(R \cdot r)$ também o sejam, de modo que a estabilidade do sistema é mantida. Assim, podem-se definir as restrições dadas pelas equações (6) e (7).

$$C > \frac{L}{R \cdot r} \quad (6)$$

$$R > r \quad (7)$$

Em um sistema real, a condição (7) será sempre satisfeita. Deste modo, a análise de estabilidade pode se ater a satisfazer a condição dada por (6). Para o circuito analisado neste trabalho, podem-se substituir em (6) os valores da Tabela 1, obtendo-se $C > 17,86 \mu\text{F}$. Para obedecer ao critério de Routh-Hurwitz e ao valor mínimo de capacitância, adota-se $C = 20 \mu\text{F}$.

3.2 Síntese de Indutância Negativa

Como analisado, anteriormente, uma das formas de se melhorar a condição de estabilidade do circuito CC consiste em aumentar a capacitância total conectada ao barramento CC. No entanto, existem algumas restrições que impedem a adição de capacitâncias elevadas, pois, apesar de garantirem a estabilidade do sistema, também são responsáveis por gerar elevadas correntes de *inrush* e de curto-circuito, que certamente afetam o sistema tanto do ponto de vista de proteção como de segurança (Ferreira e Barbosa, 2014).

Deste modo, uma maneira de contrapor a necessidade de incrementar o valor de C_{bus} pode ser compensada inserindo no circuito CC um sistema de síntese de indutância, a fim de compensar a impedância apenas nos instantes em que haja perturbações. Uma das vantagens da utilização desta estratégia reside em evitar a conexão dos capacitores adicionais supracitados. Conclusivamente, é possível reduzir o valor da capacitância mínima alterando-se a indutância do sistema. Basta analisar a equação (6), sendo que quanto menor for a indutância do ramo $r-L$, menor será o valor mínimo da capacitância necessária para conexão ao barramento CC.

A utilização de conversores estáticos para sintetizar o comportamento de indutância negativa foi proposta inicialmente para aplicações em sistemas em corrente alternada (Funato, Kawamura e Kamiyama, 1997). Nestes casos, a inclusão de uma indutância negativa resulta na redução da reatância total sem a necessidade da utilização de elementos capacitivos, evitando efeitos de ressonância.

A utilização do conceito de síntese de indutância negativa em CC baseia-se na inserção de um conversor CC-CC em série com o ramo $r-L$ do circuito conforme a Figura 5. Por sua vez, o circuito usado para emular o sistema de síntese de indutância negativa é representado na Figura 6, sendo que esse conceito também é conhecido como indutância emulada L_{emu} ou reatância indutiva virtual, composto por um capacitor e um conversor CC-CC classe D. Esses elementos são utilizados para o armazenamento e fornecimento de energia de acordo com a variação da corrente fornecida pela fonte. Como o conversor encontra-se em série, um interruptor *bypass* é utilizado no caso de eventual

ocorrência de falha no sistema (Ferreira e Barbosa, 2014).

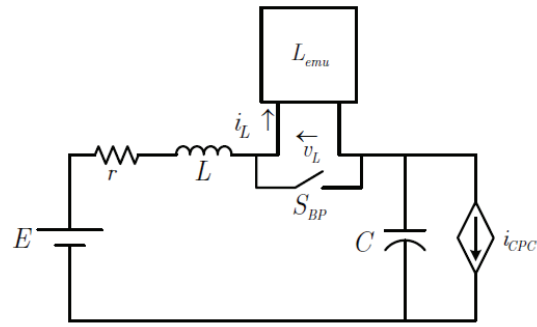


Figura 5. Circuito empregando um sistema de síntese de indutância negativa.

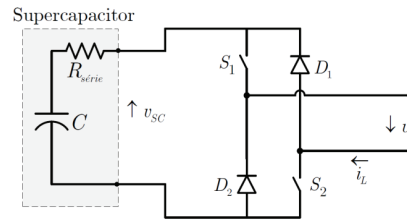


Figura 6. Conversor CC-CC classe D.

A representação do sistema de síntese de indutância negativa é mostrada na Figura 7. Assim, a tensão de saída do conversor do sistema L_{emu} é controlada a partir por uma estratégia do tipo modos deslizantes, cuja superfície de deslizamento é descrita pela seguinte relação:

$$S(t) = k \cdot (v_{ref} - v_L) \quad (8)$$

sendo v_{ref} a tensão de referência definida por $v_{ref} = L_{emu} \cdot (di_L/dt)$ e v_L a tensão de saída do conversor medida por meio de um sensor de tensão. A função de controle usada para o controle por modos deslizantes é definida pelas condições dadas em (9).

$$\delta = \begin{cases} 1, & \text{se } S(t) > 0 \\ 0, & \text{se } S(t) < 0 \end{cases} \quad (9)$$

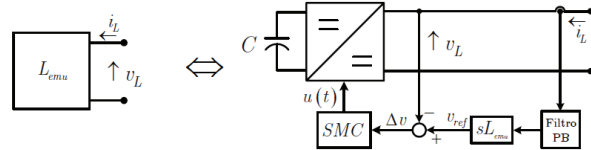


Figura 7. Sistema de síntese de indutância negativa

Há algumas restrições para o valor de L_{emu} que devem ser respeitadas para a operação plena do sistema, sendo que $L + L_{emu} > 0$. Contudo, se $L_{emu} < -L$, haverá troca de sinal na primeira coluna do arranjo de Routh, tornando o sistema instável. Deste modo, para o circuito em questão, a indutância emulada deve ser ajustada em $L_{emu} > -100 \mu\text{H}$.

Os parâmetros do circuito L_{emu} correspondem a um capacitor de 1 F e uma resistência de 75 mΩ. Os interruptores S_1 e S_2 devem ser acionados de modo complementar no intuito de possibilitar fluxo de potência bidirecional. Ou seja, quando S_1 estiver bloque-

ada, S_2 estará conduzindo, de modo que a corrente circulará através de S_2 e D_2 .

3.3 Resultados de Simulação

Os distúrbios inseridos no circuito CC acontecem basicamente devido a duas alterações. O primeiro distúrbio ocorre devido à redução de 100 V na tensão da fonte em 20 ms, retratando a redução da irradiância solar incidente nos módulos fotovoltaicos. O segundo distúrbio ocorre após 40 ms devido ao aumento da potência consumida pela carga em 1 kW.

Na Figura 8, é demonstrado o comportamento da tensão e da corrente na carga frente às perturbações usando os parâmetros definidos pelo critério de Routh-Hurwitz. Com os resultados obtidos, é possível observar que, mediante a variação de tensão da fonte e da potência consumida pela carga, o sistema ainda permanece estável, ou seja, as perturbações inseridas não foram suficientes para desestabilizá-lo. Isso ocorre porque, ao utilizar uma capacitância de barramento maior ou igual ao valor estipulado pelo critério de Routh-Hurwitz, foi assegurada a robustez do sistema.

Quando o critério de estabilidade de Routh-Hurwitz é substituído pelo uso do sistema de síntese de indutância negativa, é possível fixar a capacitância de barramento em seu valor mínimo de 20 μ F devido à redução da indutância nos condutores causada pela indutância negativa gerada por L_{emu} . O comportamento da tensão e da corrente na carga considerando variações na tensão da fonte é mostrado na Figura 9. Nota-se que o sistema permanece estável durante todo o intervalo de simulação.

3.4 Comparação entre Os Critérios de Routh-Hurwitz e Síntese de Indutância Negativa

É possível comparar o desempenho dos dois métodos segundo as formas de onda mostradas na Figura 10. Deve-se ainda ressaltar que o método de Routh-Hurwitz utilizou apenas a capacitância para o barramento CC. Por sua vez, o método da indutância emulada L_{emu} visa reduzir a necessidade de capacitâncias elevadas.

Nota-se que o sistema empregando L_{emu} apresenta menores amplitudes das oscilações se comparado ao método baseado no critério de Routh-Hurwitz. Uma análise mais detalhada também permite concluir que o método L_{emu} possui um tempo de acomodação menor, uma vez que nesse caso esse parâmetro foi reduzido em 22% e 18% para a tensão e a corrente, respectivamente.

4 Conclusão

O presente trabalho apresentou um breve estudo sobre critérios de estabilidade de pequenos sinais em sistemas CC contendo cargas do tipo potência constante e suas implicações. Foram discutidos aspectos essenciais e indispensáveis sobre diferentes metodologias embasadas no critério de estabilidade de Middlebrook, tais como, o critério de Routh-Hurwitz e suas

variantes, pautados na interação entre as impedâncias Z_f e Z_c , além da determinação do contorno de Nyquist desejado.

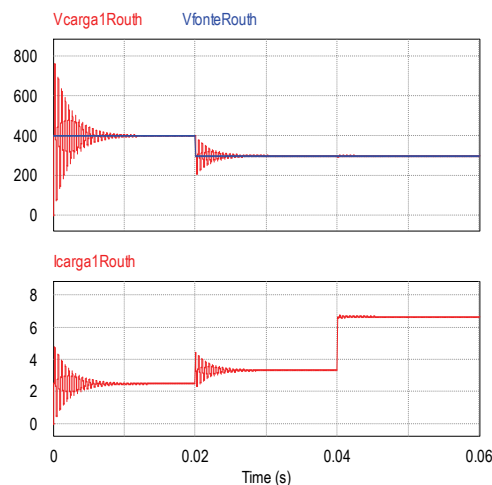


Figura 8. Comportamento da tensão e da corrente na carga usando o critério de estabilidade de Routh-Hurwitz

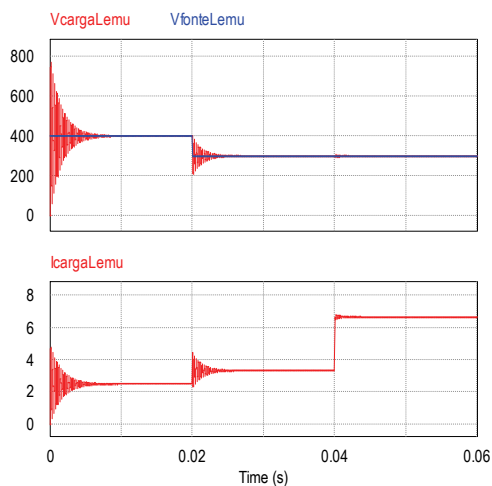


Figura 9. Comportamento da tensão e da corrente na carga usando o conceito de síntese de indutância negativa.

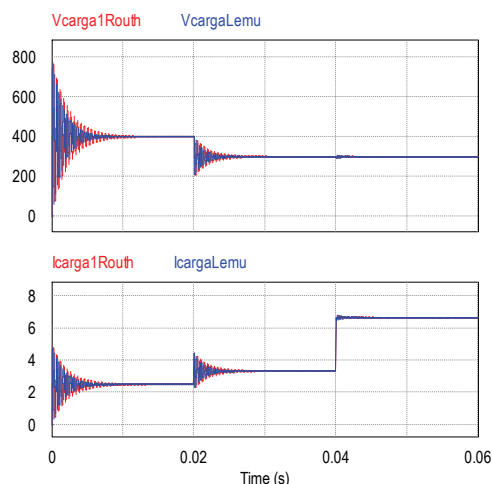


Figura 10. Comparação da tensão e da corrente obtidas com a utilização dos critérios de estabilidade de Routh-Hurwitz e síntese de indutância negativa.

A microrrede CC pode ser representada por um circuito simples composto por uma fonte CC, um condutor cujas resistências e indutância não foram desprezadas, bem como uma carga, sendo que a presença de todos os elementos foi analisada no intuito de investigar a estabilidade do sistema frente a perturbações na fonte e na carga.

Os métodos considerados bastante conservativos podem ser facilmente substituídos para a utilização do critério de Routh-Hurwitz, que se trata de um método capaz de garantir a estabilidade do sistema a partir da definição de uma capacitância mínima conectada ao barramento CC. Entretanto, em alguns casos, o valor da capacitância pode ser demasiadamente elevado e, consequentemente, gerar problemas associados a custo e mesmo a corrente de *inrush*, o que poderia essencialmente afetar a operação do sistema. Diante deste cenário, constata-se que os resultados alcançados mostraram um melhor desempenho do sistema CC.

Uma segunda alternativa para melhorar a estabilidade do sistema consiste na utilização de um sistema de síntese de indutância utilizando conversores CC-CC. Os resultados de simulação obtidos mostraram que o sistema opera de modo estável mesmo quando o valor total dos capacitores conectados ao barramento CC é menor que aquele definido pelo critério de Routh-Hurwitz.

A escolha de um conversor para emular o comportamento de um elemento reativo foi usada com sucesso em sistemas CA em outros trabalhos existentes na literatura e, no caso da microrrede CC, agrega a vantagem de eliminar as elevadas correntes de *inrush* e problemas associados a eventuais curtos-circuitos do barramento CC.

Por fim, considera-se que a utilização de sistemas de síntese de elementos reativos representa um método satisfatório, uma vez que utiliza conversores CC-CC para emular a presença de indutores e capacitores dependendo da necessidade. Por fim, tais sistemas se mostram bastante interessantes, pois atuam apenas durante os intervalos de ocorrência transitórios e, ao contrário de capacitores de volume considerável, possuem plena capacidade de controle do fluxo de potência.

Agradecimentos

Os autores gostariam de expressar sua gratidão pelo apoio fornecido por CAPES, CNPq, FAPEMIG, INERGE e Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ), que permitiram a realização deste trabalho.

Referências Bibliográficas

Abe, S.; Ninomiya, T.; Hirokawa, M. and Zaitzu, T. (2006); Stability design consideration for on-board distributed power system consisting of full-regulated bus converter and polys. In: Power Electronics Specialists Conference; pp. 1–5.

Balog, R. (2006). Autonomous local control in distributed DC power systems, PhD thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign.

Cespedes, M.; Xing, L.; Sun, J. (2011), Constant-power load system stabilization by passive damping. Power Electronics. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 26, No. 7, pp. 1832–1836.

Ferreira, R. A. F.; Barbosa, P. G. (2014), Técnicas de análise da estabilidade de tensão aplicadas a sistemas de distribuição cc modernos. In: Anais do XX Congresso Brasileiro de Automática (CBA).

Flower, J. and Hodge, C. (2004). Stability and transient-behavioural assessment of power-electronics-based dc-distribution systems part 1: The root-locus technique, Proceedings of IMarEST-Part A-Journal of Marine Engineering and Technology, No. 5, pp. 13-21.

Funato, H.; Kawamura, A. and Kamiyama, K. (1997). Realization of negative inductance using variable active-passive reactance (vapar). IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 12, No. 4, pp. 589-596.

Karlsson, P. (2002). DC Distributed Power Systems - Analysis, Design and Control for a Renewable Energy System, PhD thesis, Department of Industrial Electrical Engineering and Automation, Lund University, Sweden.

Middlebrook, R. and Cuk, S. (1976). Input filter considerations in design and application of switching regulators. In: IEEE Industry Applications annual meeting.

Schonberger, J. K. (2006). Distributed Control of a Nanogrid Using DC Bus Signalling, PhD thesis, University of Canterbury.

Sudhoff, S., Glover, S., Lamm, P., Schmucker, D. and Delisle, D. (2000). Admittance space stability analysis of power electronic systems, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems Vol. 36, No. 3, pp. 965-973.

Tahim, A. P. N.; Pagano, D. J. and Ponce, E. (2012). Nonlinear control of dc-dc bidirectional converters in stand-alone dc microgrids. In: IEEE 51st Annual Conference on Decision and Control (CDC). pp. 3068-3073.

Wildrick, C.; Lee, F.; Cho, B. and Choi, B. (1995). A method of defining the load impedance specification for a stable distributed power system. IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 10, No. 3, pp. 280-285.

Xing, L.; Feng, F. and Sun, J. (2011). Optimal damping of emi filter input impedance. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 47, No. 3, pp. 1432-1440.