

OBSERVADOR POR MODOS DESLIZANTES APLICADO NO SISTEMA DE CONTROLE DAS TENSÕES DOS CAPACITORES EQUIVALENTES DE CONVERSORES MULTINÍVEIS MODULARES

GUILHERME S. DA SILVA^{*,†} RODRIGO PADILHA VIEIRA^{*} CASSIANO RECH^{*}

^{*}Grupo de Eletrônica de Potência e Controle – GEPOC, Universidade Federal de Santa Maria
Av. Roraima, nº 1000 - Cidade Universitária, 97105-900, Bairro Camobi, Santa Maria – RS, Brasil

[†]Centro de Tecnologia de Alegrete, Universidade Federal do Pampa
Av. Tiaraçu, nº 810, 97546-550, Bairro Ibirapuitã, Alegrete – RS, Brasil

Abstract— This paper proposes a new sliding-mode observer for the equivalent capacitor voltages of a modular multilevel converter, which is applied in the converter control system. With this observer, it is possible to reduce the data flow among the submodules for a suitable control system operation. Furthermore, the proposed observer has a superior transient performance when compared to other observers proposed in the literature. The continuous-time design methodology and Lyapunov stability analysis of the proposed observer are presented. Simulation results of the discretized observer applied to the converter control system are included under distinct operating conditions. Moreover, the proposed observer performance is compared to other sliding-mode observers under a submodule failure condition.

Keywords— Modular multilevel converter, sliding-mode observers, equivalent capacitor voltage observer.

Resumo— Neste artigo é proposto um novo observador por modos deslizantes aplicado no sistema de controle de um conversor multinível modular. Com este observador, é possível reduzir o fluxo de informações necessário para o correto funcionamento do sistema de controle do conversor. Além disso, o observador proposto possui desempenho transitório superior em comparação aos observadores já propostos na literatura. São apresentadas uma metodologia de projeto em tempo contínuo e uma análise de estabilidade por Lyapunov do observador proposto. Resultados de simulação do observador discretizado, aplicado ao sistema de controle do conversor multinível modular, são incluídos sob diferentes condições de operação. Além disso, o desempenho do observador proposto é comparado com outros observadores por modos deslizantes na condição de falha de um submódulo.

Palavras-chave— Conversor multinível modular, observadores por modos deslizantes, observador das tensões dos capacitores equivalentes.

1 Introdução

Nos últimos anos, o conversor multinível modular (*Modular Multilevel Converter* – MMC) (Marquardt et al., 2002) tem sido considerado uma topologia promissora e, desde então, tem sido adotada pela indústria de sistemas de transmissão de energia em alta tensão e corrente contínua (*High Voltage Direct Current* – HVDC) para compor o sistema de conversão em altas tensões e altas potências (Perez et al., 2015).

O funcionamento adequado do MMC tradicionalmente exige a medição e a transmissão das tensões dos capacitores (Perez et al., 2015) para um processador central, o que pode ocasionar o aumento da complexidade de implementação, tanto em termos de *software* como de *hardware*. Ainda, aumenta-se a exigência computacional e a complexidade do sistema de comunicação com o aumento do número de submódulos (SMs).

Neste sentido, a organização e gerenciamento das informações necessárias para a operação adequada do MMC estão entre os principais desafios em aplicações com centenas de SMs operando simultaneamente. Inúmeros trabalhos têm sido publicados recentemente para encontrar soluções frente a esses desafios, apresentando: (i) formas de implementação dos sistemas de comunicação (Siemaszko, 2015); (ii) novas estratégias de controle com a redução do número de sensores de tensão dos capacitores (Picas et al., 2016) ou eliminação dos mesmos (Elserougi et al., 2016); e (iii)

estratégias de controle fazendo o uso de observadores de estados (Al-Wedami et al., 2015; Nademi et al., 2015; Silva et al., 2015).

Salienta-se que estratégias baseadas na eliminação dos sensores não apresentam realimentação de nenhuma informação das tensões dos capacitores, estando vulneráveis à diferenças no tempo de acionamento dos interruptores, variações paramétricas e perturbações no sistema. Diante do problema de estabilidade das estratégias em malha aberta, observadores adaptativos têm sido utilizados principalmente devido à robustez para variação paramétrica, dinâmicas não modeladas e perturbações no sistema (Nademi et al., 2015). Por outro lado, estas estratégias aumentam significativamente a complexidade de implementação.

De forma semelhante aos observadores adaptativos, a estratégia de observação por modos deslizantes também tem se mostrado atrativa devido à robustez frente incertezas paramétricas e à capacidade de rejeição à distúrbios (Shao et al., 2013; Silva et al., 2015). Além disso, as estratégias de observação por modos deslizantes apresentam simplicidade de implementação quando comparadas às demais estratégias supracitadas.

Neste artigo é proposto um novo observador por modos deslizantes das tensões dos capacitores equivalentes do MMC. Esta estratégia prevê o funcionamento do MMC com a ocorrência de variações paramétricas e dinâmicas não modeladas através da análise de estabilidade por Lyapunov, o que não é apresentado na literatura. Além disso,

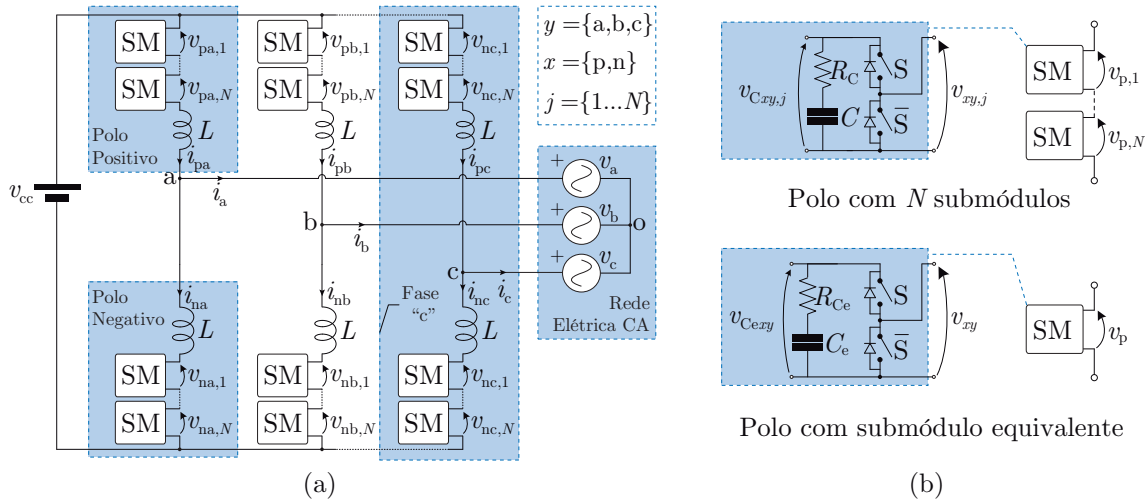


Figura 1: Conversor multinível modular. (a) Topologia trifásica. (b) Conceito de polo equivalente

o observador proposto possui desempenho transitório superior, uma vez que é possível o cancelamento de termos na função candidata a Lyapunov. Ainda, a aplicação do observador no sistema de controle utilizado possibilita a operação do conversor mesmo sob condições de distúrbios, como a ocorrência de falha dos SMs.

2 Conversor Multinível Modular

A estrutura do MMC é constituída essencialmente da conexão série de SMs que normalmente são conversores CC/CA meia-ponte ou ponte-completa (Perez et al., 2015). Dentre estas topologias, o SM meia-ponte tem sido utilizado com frequência em diferentes aplicações, principalmente devido à simplicidade de implementação.

A estrutura de SMs meia-ponte em série é conectada com indutores para compor a fase do MMC, conforme apresentado na Fig. 1 (a), onde são obtidas as tensões de fase. Cada uma das fases do conversor é composta por um polo positivo (p) e um negativo (n). Na topologia adotada neste artigo cada polo possui um arranjo série de N SMs meia-ponte que sintetizam as tensões de cada polo. A indutância L em série é utilizada para limitar as derivadas das correntes de cada polo.

Cada polo sintetiza tensões multiníveis que dependem da tensão de saída individual de cada SM. Para sintetizar as tensões multiníveis, os sinais modulantes de cada SM são comparados com as portadoras triangulares da estratégia de modulação por largura de pulso (*Pulse Width Modulation* – PWM). Neste trabalho, as múltiplas portadoras estão deslocadas em fase (*phase-shift* PWM) para gerar os sinais de comando dos interruptores de cada SM.

2.1 Conceitos básicos

Inicialmente, considera-se que a forma de onda da tensão a ser sintetizada em uma fase do MMC é definida por:

$$v_a \triangleq V_a \sin(\omega_r t) \quad (1)$$

onde V_a é a amplitude de pico da tensão de fase e ω_r é a frequência angular fundamental da rede elétrica CA.

As tensões dos polos são moduladas para sintetizar a forma de onda definida em (1). Neste caso, as modulantes possuem (Debnath et al., 2015): (i) uma componente CC comum à todos os SMs; (ii) uma componente CA que está em fase oposta no polo positivo e em fase no polo negativo, ambas com relação à v_a , dadas por:

$$m_{cc} \triangleq \frac{M_{cc}}{2} \triangleq \frac{V_{cc}}{2V_{Cx,j}N} \quad (2)$$

$$m_a \triangleq \frac{M_a}{2} \sin(\omega t) \triangleq \frac{V_a}{2V_{cc}} \sin(\omega t) \quad (3)$$

onde N é o número de SMs em um polo, M_a é o índice de modulação de amplitude CA, M_{cc} é o índice de modulação de amplitude CC e $V_{Cx,j}$ é a tensão nominal do j -ésimo capacitor ($j \in \{1, 2, \dots, N\}$), definida como $\frac{V_{cc}}{N}$.

2.2 Conceito de submódulo equivalente

Com o objetivo de obter a representação de um polo através de um SM equivalente, o MMC é inicialmente modelado a partir das equações diferenciais de um SM individual, conforme Fig. 1 (b). Assim, a tensão do capacitor do j -ésimo SM do polo $x \in \{p, n\}$ é dada por:

$$\frac{dv_{Cx,j}}{dt} = \frac{m_{x,j}i_x}{C} + m_{x,j}i_x R_C \quad (4)$$

onde C é a capacitância individual, R_C é a resistência série, $m_{x,j}$ é o sinal modulante do j -ésimo SM do polo, $v_{Cx,j}$ é a tensão do capacitor do j -ésimo SM e i_x é a corrente do polo x .

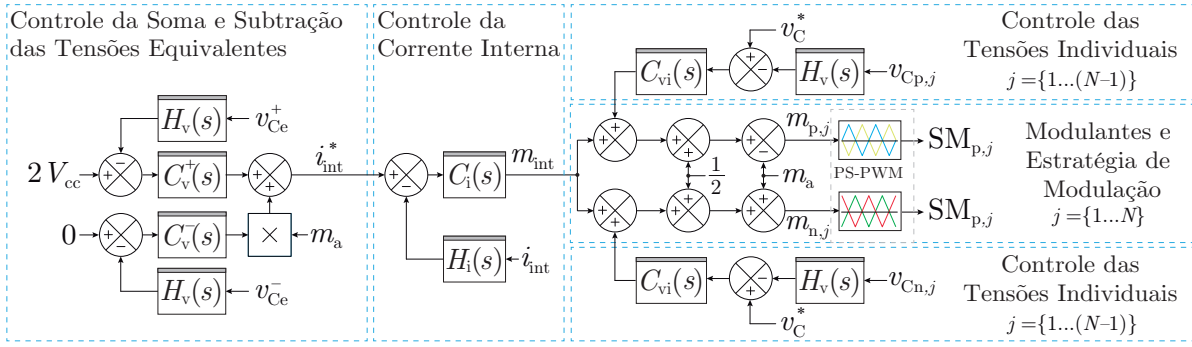


Figura 2: Sistema de controle aplicado em uma fase do MMC

A tensão equivalente é obtida pela soma das dinâmicas das tensões de todos os capacitores de um mesmo polo, dada por:

$$\sum_{j=1}^N \frac{dv_{Cx,j}}{dt} = \sum_{j=1}^N \left(\frac{m_{x,j} i_x}{C} + m_{x,j} i_x R_C \right). \quad (5)$$

Cada SM processa uma parcela da potência global do MMC e uma parcela individual de potência, associada ao ajuste das tensões dos capacitores. Assim, considerando apenas a modulante referente ao processamento global, ou seja, $m_{x,j}(t) = m_x(t)$, (5) é reescrita da seguinte forma:

$$\frac{dv_{Cex}}{dt} = \frac{m_x i_x}{C_e} + m_x i_x R_{Ce} \quad (6)$$

onde $C_e = \frac{C}{N}$, $R_{Ce} = R_C N$ e v_{Cex} é a tensão do capacitor do SM equivalente do polo x apresentado na Fig. 1 (b).

2.3 Sistema de controle empregado

Os sistemas de controle empregados no controle do MMC possuem três objetivos principais (Hagiwara et al., 2011; Debnath et al., 2015):

1. Controle da componente CC da corrente interna, garantindo a minimização das componentes no dobro da frequência fundamental;
2. Ajuste da tensão equivalente de cada polo, garantindo o controle dos fluxos de potência entre barramento CC, polos do MMC e carga;
3. Ajuste do fluxo de potência individual necessário para ajustar as tensões CC de cada SM.

Neste sentido, as modulantes individuais de cada SM são dadas por

$$m_{x,j} = m_{int} \mp m_a + \Delta m_{x,j} \quad (7)$$

onde a componente m_{int} é a modulante comum aos dois polos, composta por uma componente CC e outra CA, que representa o controle do fluxo de potência entre o barramento CC e rede elétrica CA, a componente CA m_a na frequência fundamental representa a forma de onda de tensão de

fase e a componente individual $\Delta m_{x,j}$ representa o ajuste individual das tensões dos capacitores.

O sistema de controle do MMC apresentado na Fig. 2 baseia-se na composição das modulantes supracitadas. O sistema de controle apresentado é composto por uma malha interna de corrente, duas malhas externas de tensão e $N - 1$ malhas de controle por polo.

A malha interna tem como objetivo controlar as componentes CC e CA da corrente interna de acordo com as referências das malhas de controle da soma e da subtração das tensões dos capacitores equivalentes. A malha externa da soma das tensões equivalentes ($v_{Ce}^+ = v_{Cep} + v_{Cen}$) modifica a componente contínua da corrente i_{int} , com o objetivo de ajustar o balanço de potência entre o barramento CC e a rede elétrica CA (Hagiwara et al., 2011; Perez et al., 2015). Já a malha externa da subtração das tensões ($v_{Ce}^- = v_{Cep} - v_{Cen}$) equilibra as tensões equivalentes dos polos através da inserção de uma componente CA na frequência fundamental na corrente interna (Hagiwara et al., 2011).

O sistema de controle permite que os controladores globais (interna, soma e subtração) sejam executados em um processador central e que os $N - 1$ controladores individuais sejam implementados em processadores locais nos SMs. Desta forma, observadores podem ser utilizados no sistema de controle da soma e subtração das tensões equivalentes, evitando que todas as tensões dos capacitores sejam enviadas para o processador central, reduzindo os esforços de comunicação.

3 Observador por modos deslizantes

De acordo com (Utkin, 1993) um sistema dinâmico opera em modo deslizante quando uma das entradas do sistema é uma função chaveada, a qual permite tornar a derivada dos estados positiva ou negativa. Esta função chaveada possibilita que os estados reais do sistema sejam rastreados a partir do modelo dinâmico do sistema.

3.1 Modelo dinâmico do MMC

O modelo dinâmico do MMC é obtido a partir do circuito mostrado na Fig. 3. A partir deste cir-

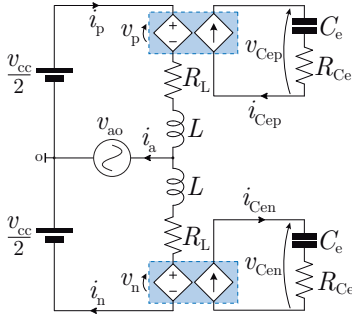


Figura 3: Circuito equivalente por fase do MMC

cuito são obtidas as equações diferenciais da corrente i_p e da tensão do capacitor equivalente do polo positivo v_{Cep} , dadas por:

$$\frac{di_p}{dt} = \frac{v_{cc}}{2L} - \frac{v_p}{L} - \frac{R_L i_p}{L} - \frac{v_a}{L} \quad (8)$$

$$\frac{dv_{Cep}}{dt} = \frac{m_p i_p}{C_e} \quad (9)$$

onde $v_p = m_p v_{Cep} + R_{Ce} m_p^2 i_p$ é a tensão sintetizada no polo positivo.

As equações (8) e (9) podem ser reescritas considerando as variações em torno da indutância nominal e da capacitância nominal:

$$\frac{di_p}{dt} = L_{nom}^{-1} \left(\frac{v_{cc}}{2} - m_p v_{Cep} - v_a \right) + \xi_{L\Delta} \quad (10)$$

$$\frac{dv_{Cep}}{dt} = C_{e,nom}^{-1} m_p i_p + \xi_{C\Delta} \quad (11)$$

onde a indutância e a capacitância equivalente são modeladas com variação em torno dos seus valores nominais, sendo $L^{-1} = L_{nom}^{-1} + L_{\Delta}^{-1}$ e $C_e^{-1} = C_{e,nom}^{-1} + C_{e,\Delta}^{-1}$. Desta forma, os termos L_{Δ}^{-1} , $C_{e,\Delta}^{-1}$, R_{Ce} e R_L são agrupados em $\xi_{L\Delta}$ e $\xi_{C\Delta}$ com o objetivo de avaliar o efeito das variações paramétricas e dinâmicas não-modeladas, sendo:

$$\xi_{L\Delta} = L_{\Delta}^{-1} \left(\frac{v_{cc}}{2} - m_p v_{Cep} \right) - L^{-1} i_p (R_{Ce} m_p^2 + R_L) \quad (12)$$

$$\xi_{C\Delta} = C_{e,\Delta}^{-1} m_p i_p + m_p i_p R_{Ce}. \quad (13)$$

3.2 Observador das tensões dos capacitores equivalentes

De acordo com (Utkin, 1993) as equações dos observadores podem ser dadas por:

$$\frac{d\hat{i}_p}{dt} = \frac{v_{cc}}{2L_{nom}} - \frac{m_p \hat{v}_{Cep}}{L_{nom}} - \frac{v_a}{L_{nom}} + u_p \quad (14)$$

$$\frac{d\hat{v}_{Cep}}{dt} = \frac{m_p \hat{i}_p}{C_{e,nom}} - K_{vp1} \frac{m_p \tilde{i}_p}{L_{nom}} - K_{vp2} |\tilde{i}_p| u_p \quad (15)$$

onde $\hat{i}_p$ é a corrente observada do polo positivo, $\hat{v}_{Cep}$ é a tensão observada do capacitor equivalente do polo positivo, K_{vp1} e K_{vp2} são os ganhos do observador de tensão do polo positivo e u_p é a função chaveada do observador do polo positivo, dada por:

$$u_p = -K_{ip} \text{sign}(\tilde{i}_p) \quad (16)$$

onde K_{ip} é o ganho da função chaveada e $\tilde{i}_p$ é o erro entre a corrente observada e medida do polo positivo, dada por:

$$\tilde{i}_p = \hat{i}_p - i_p. \quad (17)$$

Salienta-se que os termos $|\tilde{i}_p|$ e $\frac{m_p \tilde{i}_p}{L}$ de (15) representam uma melhoria no desempenho transitório do observador quando comparado com outras estratégias aplicadas ao MMC. Estes termos proporcionam o aumento do desempenho do observador conforme é descrito na análise por Lyapunov da seção 3.3.

3.3 Análise por Lyapunov

Considerando a superfície de deslizamento apresentada em (17) e as equações (8), (9), (14) e (15), obtém-se as equações dinâmicas de $\tilde{i}_p$ e $\tilde{v}_{Cep}$, dadas por:

$$\frac{d\tilde{i}_p}{dt} = u_p - \frac{m_p}{L_{nom}} \tilde{v}_{Cep} + \xi_{L\Delta} \quad (18)$$

$$\frac{d\tilde{v}_{Cep}}{dt} = \frac{m_p \tilde{i}_p}{C_{e,nom}} - K_{vp1} \frac{m_p \tilde{i}_p}{L_{nom}} - K_{vp2} |\tilde{i}_p| u_p + \xi_{C\Delta}. \quad (19)$$

Considere a seguinte candidata a função Lyapunov:

$$V = \frac{1}{2} (\tilde{v}_{Cep}^2 + \tilde{i}_p^2) \geq 0. \quad (20)$$

A derivada de (20) resulta em:

$$\dot{V} = \dot{\tilde{v}_{Cep}} \tilde{v}_{Cep} + \dot{\tilde{i}_p} \tilde{i}_p. \quad (21)$$

Substituindo (18) e (19) em (21) resulta-se em:

$$\begin{aligned} \dot{V} = & \left(\frac{m_p}{L_{nom}} + K_{vp1} \frac{m_p}{C_{e,nom}} + K_{vp2} K_{ip} \right) \tilde{i}_p \tilde{v}_{Cep} \\ & - K_{ip} |\tilde{i}_p| + \xi_{C\Delta} \tilde{v}_{Cep} + \xi_{L\Delta} \tilde{i}_p. \end{aligned} \quad (22)$$

Analizando (22) verifica-se que K_{ip} deve ser grande o suficiente para cancelar os termos $\xi_{C\Delta} \tilde{v}_{Cep}$ e $\xi_{L\Delta} \tilde{i}_p$, que são referentes à variações paramétricas e dinâmicas não-modeladas. Desta forma para $\dot{V} < 0$ o ganho K_{vp1} é dado por:

$$K_{vp1} = -\frac{L_{nom}^{-1} m_p + K_{vp2} K_{ip}}{C_{e,nom}^{-1} m_p}. \quad (23)$$

4 Resultados de simulações

Resultados de simulação são obtidos através do software Matlab/Simulink® para demonstrar o desempenho do observador das tensões equivalentes sob diferentes condições de operação. Os parâmetros de simulação estão apresentados na Tabela 1 e o diagrama completo da simulação está mostrado na Fig. 4. O MMC utilizado nas simulações

Tabela 1: Parâmetros do sistema proposto

Parâmetros	Valores
Potência de saída	$S_a = 10 \text{ kVA}$
Capacitância equivalente	$C_{e,nom} = 1 \text{ mF}$
Resistência equivalente	$R_{Ce} = 10 \Omega$
Indutância do polo	$L_{nom} = 10 \text{ mH}$
Resistência do polo	$R_L = 1 \Omega$
Frequência da rede CA	$f_a = 60 \text{ Hz}$
Tensão do barramento CC	$V_{cc} = 800 \text{ V}$
Frequência de chaveamento	$f_{sw} = 6 \text{ kHz}$
Frequência de amostragem	$f_s = 12 \text{ kHz}$
Índice de modulação de amplitude	$m_a = 0.7778$
Número de SMs por polo	$N = 3$

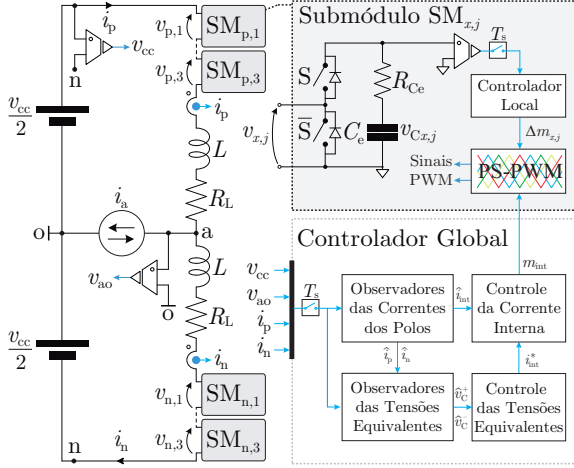


Figura 4: Estrutura do sistema simulado

possui três SMs por polo possibilitando a síntese de sete níveis de tensão em v_a .

No resultado da Fig. 5 (a) é apresentado o desempenho dos observadores frente à degraus de carga. O equilíbrio das tensões dos capacitores equivalentes do MMC depende da quantidade de potência ativa extraída do barramento CC, obtida através da componente CC da corrente interna i_{int} , e da potência ativa entregue à rede elétrica CA, obtida através da componente CA na frequência fundamental das correntes dos polos. Com o objetivo de testar o desempenho dos observadores sob variações de carga modificou-se a amplitude da corrente i_a de 0 para 0,5 p.u. em 0,2 s e de 0,5 p.u. para 1 p.u. em 0,5 s. Desta forma, a componente CC da corrente interna é modificada para equilibrar o fluxo de potência global do MMC, onde é realizado o ajuste da referência da malha interna de corrente por meio da malha externa da soma das tensões equivalentes. É importante destacar que as tensões observadas informam adequadamente o sistema de controle, uma vez que seguem adequadamente as tensões reais.

Na Fig. 5 (b) é apresentado o desempenho dos observadores sob variações paramétricas. Neste resultado iniciou-se a simulação com indutâncias distintas nos polos ($L_p = 10 \text{ mH}$ e $L_n = 9 \text{ mH}$). Além disso, os controladores C_v^- e C_{vi} foram des-

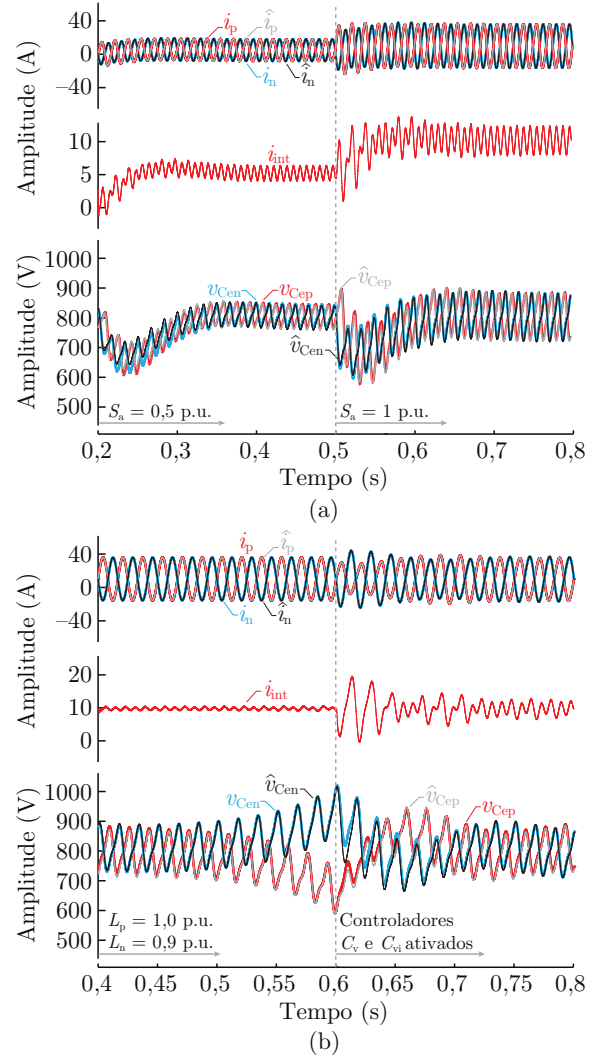


Figura 5: Resultados de simulação (a) com degrau de carga de 0→0,5 p.u. em 0,2 s e 0,5 → 1 p.u. em 0,5 s, e (b) considerando variações paramétricas em L_n de 1 p.u.→0,9 p.u.

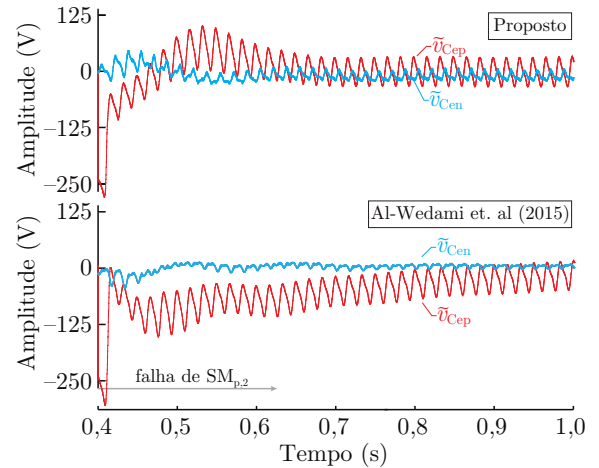


Figura 6: Resultados de simulação do desempenho do observador frente à falha no $SM_{p,2}$ em 0,4 s

tivados no intervalo de 0,4 s até 0,6 s, provocando um desequilíbrio entre as tensões dos capacitores equivalentes de cada polo. Assim, a partir do instante de tempo de 0,6 s os controladores são ati-

vados e as malhas de controle da subtração das tensões equivalentes e as malhas de controle individuais ajustam as tensões para os valores de referência. Observa-se os observadores das tensões equivalentes rastream as tensões reais mesmo com um desequilíbrio causado por uma variação paramétrica nas indutâncias dos polos.

Já na Fig. 6 é apresentada uma comparação em termos de desempenho transitório do observador proposto neste artigo e por (Al-Wedami et al., 2015). Neste resultado de simulação são apresentados os erros dos observadores após na ocorrência de uma falha do submódulo $SM_{p,2}$ no instante de 0,4 s, o qual é retirado de operação. Observa-se que neste instante de tempo a tensão do capacitor equivalente do polo positivo é reduzida em $\frac{1}{3}$ do seu valor nominal (V_{cc}), devido à retirada de operação do submódulo $SM_{p,2}$. Ambos observadores rastream as tensões equivalentes com o uso de mesmos ganhos K_{vp2} e K_{ip} , com destaque para o observador proposto que apresenta um menor tempo de acomodação.

5 Conclusões

A forma de implementação e gerenciamento da informações necessárias para o funcionamento adequado do conversor multinível modular é uma tarefa desafiadora. A estratégia proposta possibilita que o sistema de controle do MMC seja implementado apenas com o envio das medições de corrente e dos sinais modulantes comuns produzidos pelas malhas de controle da corrente interna, sem a necessidade do envio das $6N$ tensões dos capacitores à um processador central.

Os resultados de simulação destacam o desempenho superior do observador proposto em comparação à observadores propostos na literatura. Além disso, os resultados demonstram que o observador apresenta comportamento adequado sob condições de variação da potência injetada na rede elétrica CA, variações paramétricas e perturbações no sistema causadas pela falha de um SM.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro.

Referências

Al-Wedami, A., Al-Hosani, K. and Beig, A. R. (2015). Sliding mode observer of submodular capacitor voltages in Modular Multilevel Converter, *2015 International Workshop on Recent Advances in Sliding Modes (RASM)*, IEEE, pp. 1–6.

Debnath, S., Qin, J., Bahrani, B., Saeedifard, M. and Barbosa, P. (2015). Operation, Control, and Applications of the Modular Multilevel Converter: A Review, *IEEE Trans. Power Electron.* **30**(1): 37–53.

Elserougi, A. A., Massoud, A. M. and Ahmed, S. (2016). A Switched-Capacitor Submodule for Modular Multilevel HVDC Converters With DC-Fault Blocking Capability and a Reduced Number of Sensors, *IEEE Trans. Power Delivery* **31**(1): 313–322.

Hagiwara, M., Maeda, R. and Akagi, H. (2011). Control and analysis of the modular multilevel cascade converter based on double-star chopper-cells (MMCC-DSCC), *IEEE Trans. Power Electron.* **26**(6): 1649–1658.

Marquardt, R., Lesnicar, A. and Hildinger, J. (2002). Modulares Stromrichterkonzept für Netzkupplungsanwendungen bei hohen Spannungen, *ETG Fachtagung*.

Nademi, H., Das, A. and Norum, L. E. (2015). Modular multilevel converter with an adaptive observer of capacitor voltages, *IEEE Trans. Power Electron.* **30**(1): 235–248.

Perez, M. A., Bernet, S., Rodriguez, J., Kouro, S. and Lizana, R. (2015). Circuit Topologies, Modeling, Control Schemes, and Applications of Modular Multilevel Converters, *IEEE Trans. Power Electron.* **30**(1): 4–17.

Picas, R., Zaragoza, J., Pou, J., Ceballos, S. and Balcells, J. (2016). New Measuring Technique for Reducing the Number of Voltage Sensors in Modular Multilevel Converters, *IEEE Trans. Power Electron.* **31**(1): 177–187.

Shao, S., Wheeler, P. W., Clare, J. C. and Watson, A. J. (2013). Fault Detection for Modular Multilevel Converters Based on Sliding Mode Observer, *IEEE Trans. Power Electron.* **28**(11): 4867–4872.

Siemaszko, D. (2015). Fast Sorting Method for Balancing Capacitor Voltages in Modular Multilevel Converters, *IEEE Trans. Power Electron.* **30**(1): 463–470.

Silva, G. S., Vieira, R. P. and Rech, C. (2015). Modified sliding-mode observer of capacitor voltages in modular multilevel converter, *2015 IEEE 13th Brazilian Power Electronics Conference and 1st Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC)*, pp. 1–6.

Utkin, V. (1993). Sliding mode control design principles and applications to electric drives, *IEEE Trans. Ind. Electron.* **40**(1): 23–36.