

LIMITAÇÃO DE CORRENTE EM UM REGULADOR DE TENSÃO CONTROLADO EM TENSÃO

Allan Diego Maffezzolli¹, Rubens T. Hock Jr², Alessandro L. Batschauer²

¹WEG S.A., Jaraguá do Sul – SC, Brasil,

²Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC, Joinville – SC, Brasil

e-mail: diegomaffezzolli@gmail.com, rubens.t.hock@ieee.org, alessandro.batschauer@udesc.br

Resumo – Os compensadores de reativos controlados em tensão operando em redes de distribuição de energia estão suscetíveis a distúrbios de tensão (afundamentos, elevações, surtos, interrupções e curto-circuito), assim, é possível que estes venham a processar correntes elevadas, podendo levar ao seu desligamento ou, até mesmo, torná-los inoperantes. Esse trabalho apresenta um novo conceito de Resistência Virtual Não Linear aplicado a um DSTATCOM (Distribution Static Synchronous Compensator) controlado em tensão. A técnica limita a potência de saída do conversor por meio da limitação de corrente do conversor. Em condição normal de operação, a técnica não altera a resposta dinâmica da malha de tensão. O conceito proposto permite que o DSTATCOM permaneça operante em condições de distúrbios da rede elétrica, protegendo o conversor e as cargas próximas ao ponto comum de conexão. O trabalho é concluído com a implementação da técnica em um protótipo de 10 kVA. A validação da proposta por meio de resultados experimentais obtidos comprova o bom funcionamento do limitador de corrente em condição de distúrbios.

Palavras-Chave – Limitação de Corrente, Resistência Virtual Não Linear, Regulação de Tensão, DSTATCOM, Distúrbios da rede, Afundamento, Elevação.

CURRENT LIMITATION OF A VOLTAGE-CONTROLLED VOLTAGE REGULATOR

Abstract Voltage-controlled static compensators operating in distribution networks grid are susceptible to transients (sag, swell, surge, interruption and short circuit), so they would process high peak currents, which may lead to their shutdown, or even render them inoperative. This paper presents a new concept of Nonlinear Virtual Resistance applied to a voltage controlled DSTATCOM (Distribution Static Synchronous Compensator). The technique limits the converter output power by limiting the converter current. In normal operating condition the technique does not change the dynamic response of the voltage loop. The proposed concept allows the DSTATCOM to remain operative during disturbances of the grid, protecting the converter and the loads near to the point of common coupling. The work is concluded with the implementation of the technique in a 10 kVA prototype. The experimental results obtained demonstrate the good functioning of the current limiter under disturbed conditions.

Keywords – Current Limiting, Nonlinear Virtual Resistance, Voltage Regulation, DSTATCOM, Network Disturbances, Sag, Swell.

I. INTRODUÇÃO

As redes de distribuição podem sofrer com problemas de Qualidade de Energia Elétrica (QEE), que incluem baixo fator de potência, valor eficaz de tensão inadequado, transitórios de tensão, distorção harmônica na tensão e na corrente [1]. O Módulo 8 do PRODIST (Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional) estabelece limites e valores de referência para adequação da qualidade de energia fornecida à seus consumidores [2].

Uma solução para mitigar os problemas de qualidade de energia é a utilização de compensadores estáticos de reativos de distribuição (Distribution Static Synchronous Compensator – DSTATCOM), usualmente conectados em derivação com Ponto de Conexão Comum (PCC). Os DSTATCOMs são usualmente compostos por um inversor de tensão e um filtro passa baixas, sendo empregados isoladamente [3], em conjunto com filtros passivos adicionais, sintonizados para harmônicas específicas, formando sistemas híbridos [4], ou mesmo, incorporados em outros equipamentos, como uma estação de carga de veículos elétricos [5].

As principais estratégias de controle aplicadas aos DSTATCOMs são divididas em dois grupos: o controle de corrente de saída e o controle da tensão do PCC [6].

O sistema de controle de corrente realiza a injeção de corrente no PCC de forma a absorver ou fornecer potência reativa para a rede de distribuição. No modo de controle de corrente, o próprio controlador se encarrega de limitar a corrente de saída do DSTATCOM, sem a adição de outras técnicas [7] [8]. Essa característica do sistema de controle de corrente aumenta a imunidade do DSTATCOM frente a uma situação de curto-circuito no PCC, que pode ocasionar o desligamento ou, até mesmo, danos permanentes ao conversor. Em contrapartida, o controle de corrente não impõe a tensão do PCC, resultando em uma menor eficácia na solução de distúrbios de tensão encontrados em situações de funcionamento anormal do sistema, como mostrado na Figura 1.

Em [7] [9] [10] são propostas a regulação do valor eficaz de tensão juntamente com mitigação de harmônicas presentes

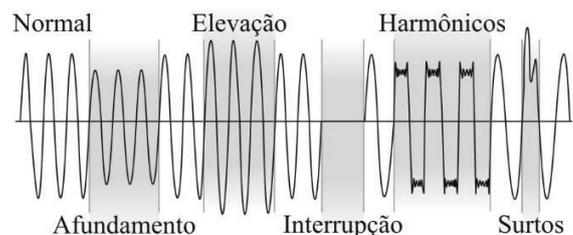


Fig. 1. Distúrbios de tensão encontrados na rede elétrica.

nas tensões do PCC. O controle empregado é do tipo cascata, onde a malha de controle interna é responsável pelo controle de corrente de saída, garantindo o formato e a fase da corrente, enquanto uma malha externa controla o valor eficaz da corrente em função da tensão eficaz do PCC. Desta forma, a resposta dinâmica da malha de regulação de tensão é lenta, da ordem de unidades de ciclos de rede.

Em [11] é proposta a utilização do filtro de Kalman para detecção e atuação em condições de afundamento de tensão. Além da complexidade da técnica proposta, os resultados apresentam resposta lenta quando há necessidade de realizar o reestabelecimento da tensão de fornecimento. Essa característica provoca elevação na tensão do PCC durante transitórios, podendo causar danos ao DSTATCOM e aos demais elementos que compõem a rede.

Em [12] é apresentado um filtro ativo paralelo para compensação de harmônicas em redes de distribuição. Os autores utilizaram o controle em cascata de corrente e tensão e um controle *feedforward*, para reduzir o impacto da distorção da tensão da rede na corrente de entrada. O controle da tensão é um servo controlador com tempo de acomodação da ordem de segundos e uma limitação feita de forma dinâmica. Além da dinâmica lenta da malha de tensão, observa-se que não foram analisadas situações de falta da rede e a necessidade de limitação de corrente.

Ao operar em modo de controle de tensão, o DSTATCOM é capaz de impor ao PCC tensões controladas, ou seja, tensões senoidais isentas de componentes harmônicas, equilibradas e com amplitude adequada. Ao impor a tensão ao PCC, o conversor se comporta como uma fonte de tensão, fornecendo ao sistema um caminho de baixa impedância para a circulação de componentes harmônicas de corrente [13].

O DSTATCOM controlado em tensão é capaz de proteger as cargas sensíveis de distúrbios de tensão, absorvendo os transitórios pela imposição de tensão ao PCC. No entanto, a corrente processada é consequência do sistema o qual o DSTATCOM está regulando. Sendo assim, é possível que a corrente processada pelo DSTATCOM ultrapasse os limites seguros de operação do mesmo, acarretando no desligamento indesejado ou, até mesmo, danificando o equipamento [14].

Em [15], o DSTATCOM é desligado quando é detectado um valor de corrente acima dos limites, deixando desprotegidas as cargas conectadas ao PCC.

Li et al. [16] propõe um controle indireto de corrente de curto-circuito, onde variações bruscas na tensão do barramento c.c. e do ângulo de defasagem são corrigidas através do índice de modulação. Entretanto a solução não limita de forma eficaz a corrente de curto-circuito, permitindo até 3 p.u. de corrente durante uma falta, desta forma, não sendo efetiva para proteger os semicondutores. Além disso, não foram realizados ensaios experimentais com a técnica proposta.

Em [6] é proposta uma mudança no sistema de controle de tensão para corrente na presença de uma falta, através de um sinal externo. A resposta transitória da comutação dos sistemas de controle apresenta picos de corrente e surtos de tensão, contribuindo com potenciais instabilidades dos controladores.

Em [17] e [18] os autores utilizam o conceito de resistência virtual aplicado a uma microrrede de energia. Nestes trabalhos

a resistência virtual foi utilizada para aprimorar o compartilhamento de potência entre diferentes geradores distribuídos conectados a microrrede, utilizando a resistência virtual em conjunto com o controle por decaimento de tensão (*droop control*). Nestes trabalhos é empregado um controle em cascata de tensão e corrente e o conceito de resistência virtual não é aplicado para a proteção em caso de falta na rede.

Na referência [19] os autores utilizam uma resistência virtual adaptativa, ajustada por um controlador PI, em um sistema distribuído de baterias para adaptar o compartilhamento de potência destes sistemas de baterias em uma microrrede de corrente contínua. A resistência virtual é linear, partindo de valor mínimo e sendo ajustada pelo controle. Também salienta-se que, além do fato da resistência ser linear, diferente do trabalho proposto, o foco da resistência não é proteger o sistema em caso de falta.

Visando suprir as lacunas das técnicas encontradas na literatura, o presente artigo apresenta uma extensão do trabalho [20], o qual propõe a combinação do sistema de controle em tensão com o conceito de Resistência Virtual Não Linear (RVNL) para limitar a corrente de saída de um DSTATCOM. A técnica proposta tem atuação restrita aos transitórios de distúrbios de tensão do PCC, protegendo o DSTATCOM e mantendo a regulação de tensão para as cargas críticas conectadas ao PCC. Com a utilização da RVNL, o sistema de controle não precisa ser modificado, o que traz uma vantagem significativa à solução proposta. Além disso, com a RVNL é possível proteger o DSTATCOM de curto-circuitos trifásicos no PCC. Neste é artigo o funcionamento da técnica RVNL é mostrado com mais detalhes, bem como o funcionamento da técnica *anti-windup*, a qual não havia sido demonstrada em [20]. Além disso, neste trabalho é apresentado um protótipo construído e resultados experimentais, para validar a técnica proposta.

O artigo é organizado da seguinte forma. Na Seção II é apresentada a topologia do conversor e as malhas de controle do DSTATCOM utilizado para validação da técnica proposta. Na Seção III são descritos os detalhes da técnica RVNL proposta e são apresentados os estados da operação do conversor durante os distúrbios de tensão. Na Seção IV são apresentados os resultados experimentais para diferentes condições de falta. Finalmente, as conclusões são apresentadas na Seção V.

II. CIRCUITO DE POTÊNCIA E CONTROLE DO DSTATCOM

O estágio de potência do DSTATCOM é composto por um conversor meia ponte trifásico a quatro fios com filtro de saída do tipo de LC, conforme ilustrado na Figura 2. O PCC é representado pelos pontos A, B, e C, destacando cada uma das fases do sistema.

Na Figura 3 é mostrada a estrutura de controle do DSTATCOM, a qual apresenta três malhas de tensão, acrescidas da técnica RVNL.

As malhas de tensão de saída são responsáveis pelo controle da tensão do PCC, sendo uma malha para cada fase. Para o controle do barramento c.c. existem duas malhas: uma malha de tensão total do barramento c.c., que controla a carga dos capacitores através do ângulo de defasagem entre a tensão

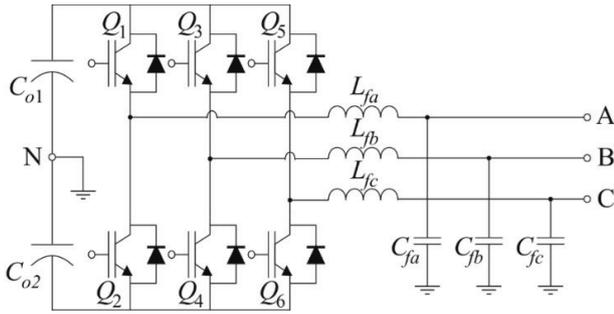


Fig. 2. Circuito de potência do DSTATCOM.

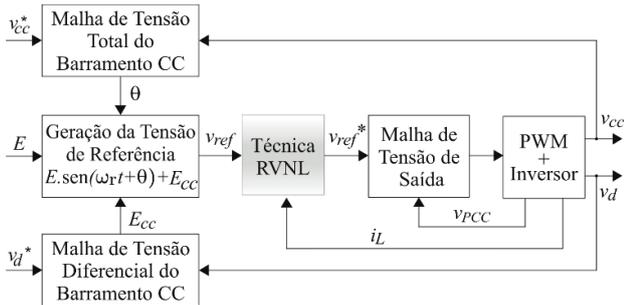


Fig. 3. Diagrama de blocos do controle do DSTATCOM utilizando a técnica RVNL.

da rede e a tensão do PCC (θ) e uma malha de tensão diferencial, que regula o equilíbrio entre as tensões dos capacitores adicionando um pequeno nível médio nas tensões do PCC (E_{cc}). Desta forma, as tensões de referência v_{ref} são baseadas nos sinais de controle das malhas de tensão e da tensão E , que define a amplitude da tensão que será imposta ao PCC e possui amplitude constante, conforme a equação:

$$v_{ref} = E \sin(\omega_r t + \theta) + E_{cc} \quad (1)$$

A análise de cada malha de controle e o projeto dos controladores são apresentados em [14].

A técnica de limitação de corrente aqui proposta, efetua a alteração da tensão de referência, levando os controladores a saturação. Para melhorar a dinâmica adiciona-se ao controle uma técnica *anti-windup* denominada *back calculation* [21] [22]. A técnica *anti-windup* atua quando o controlador excede os limites do atuador, onde um sinal de realimentação é gerado pela diferença entre o sinal saturado de controle e o sinal não-saturado e, a seguir, utilizado para reduzir a magnitude da entrada do integrador. O sinal de realimentação em um dado instante de amostragem t , $h(t)$, é descrito como:

$$h(t) = K_i \cdot [u(t) - v(t)] \quad (2)$$

onde $u(t)$ é a saída do controlador (não-saturado) e $v(t)$ é o sinal que realmente atua (saturado) no processo a ser controlado (saída do atuador). A constante K_i determina o quanto é subtraído da parcela a ser integrada e, conseqüentemente, em quanto é reduzido o termo integral. Uma redução desta variável, faz com que o sinal de controle saia mais rapidamente da região de saturação, alcançando o valor de regime em menos tempo, melhorando o desempenho do sistema. O circuito *anti-windup* implementado é ilustrado na Figura 4.

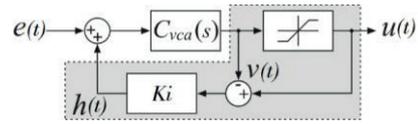


Fig. 4. Técnica de *anti-windup* implementada no controlador da tensão de saída do DSTATCOM.

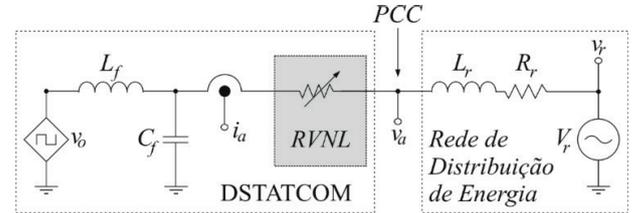


Fig. 5. Representação do DSTATCOM com a técnica RVNL.

III. TÉCNICA DE RESISTÊNCIA VIRTUAL NÃO LINEAR

A técnica de limitação da corrente de saída proposta para o DSTATCOM controlado em tensão utiliza o conceito de RVNL. A RVNL emula o efeito de uma resistência de valor variável adicionada em série com o filtro de saída do conversor, o que na prática atenua a tensão imposta pelo DSTATCOM ao PCC, diminuindo a corrente do indutor de saída (L_f) enquanto o DSTATCOM operar em condições desfavoráveis, conforme ilustrado na Figura 5.

A técnica RVNL pode ser vista como uma malha externa à malha de tensão de saída, sendo a entrada composta pela tensão de referência gerada v_{ref} e a saída é uma nova tensão de referência da malha de tensão de saída v_{ref}^* .

A vantagem da técnica RVNL, em comparação com as técnicas de controle de corrente e tensão em cascata, é a manutenção da resposta dinâmica do controlador de tensão de saída, além de não alterar o controlador projetado.

A técnica RVNL visa assegurar a operação do DSTATCOM dentro dos limites de corrente do equipamento durante condições de afundamentos e de curto-circuito no PCC, gerando a proteção das cargas conectadas próximas ao PCC, sem interferir na dinâmica do controle em condições normais de operação.

A. A Técnica RVNL

Em condições de operação em que o valor de pico das correntes de saída permanece abaixo do valor limiar determinado pelo projetista, a técnica RVNL tem efeito nulo na referência de tensão, ou seja, o sinal v_{ref}^* é igual a v_{ref} . Quando o limite de corrente é ultrapassado, o valor emulado da RVNL aumenta proporcionalmente ao valor excedido, provocando uma atenuação progressiva da tensão de saída do conversor.

A Figura 5 apresenta o diagrama simplificado do DSTATCOM com a técnica RVNL, conectado ao ponto de conexão comum e a rede elétrica, evidenciando o efeito da resistência emulada.

Na Figura 6 é apresentado o diagrama de blocos do DSTATCOM e dos blocos que compõem a técnica RVNL. O

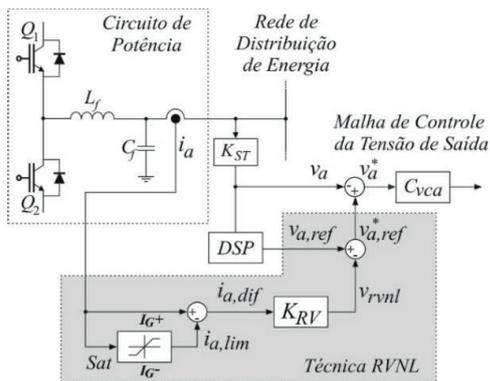


Fig. 6. Diagrama de blocos da técnica RVNL para a fase A.

bloco *Sat* representa um saturador, tendo como limites de saturação os valores limiares de corrente I_G , ou seja, I_G é o valor de corrente para o qual a técnica RVNL começa a atuar.

O bloco K_{RV} é uma constante que define a resistência virtual aplicada. O sinal gerado v_{rvnl} , que representa a tensão sobre a resistência virtual não linear, é subtraído do sinal de entrada $v_{a,ref}$, criando o sinal de referência da malha de tensão de saída $v_{a,ref}^*$. Salienta-se este sinal v_{rvnl} é nulo se a corrente for menor que o valor limiar, caracterizando a operação não linear da resistência virtual. O sinal de referência $v_{a,ref}^*$ é comparado com a amostra da tensão de saída do DSTATCOM v_a e o erro v_a^* é compensado pelo controlador de tensão de saída C_{vca} , gerando o sinal que entra no modulador por largura de pulsos para a definição dos pulsos de comando dos transistores Q_1 e Q_2 . Salienta-se que, a amostra da tensão de saída do DSTATCOM v_a é obtida com o auxílio de um sensor de tensão, cujo ganho é representado por K_{ST} . Este sinal é fornecido ao Processador Digital de Sinais (DSP – *Digital Signal Processor*), responsável pela geração do sinal $v_{a,ref}$.

B. Princípio de Operação da Técnica RVNL para Condições de Afundamentos de Tensão

O princípio de operação da RVNL é ilustrado na Figura 7.

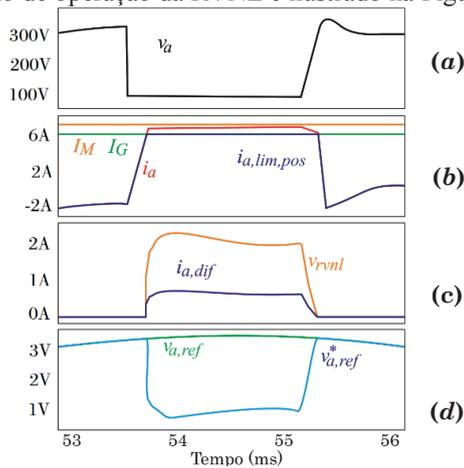


Fig. 7. Tensões e corrente da fase *a* do DSTATCOM para uma condição de afundamento de tensão. (a) tensão do PCC (v_a); (b) Corrente de fase (i_a), corrente limiar da técnica RVNL (I_G), corrente máxima admissível (I_M), referência de corrente para o controle com limitação positiva ($i_{a,lim,pos}$); (c) tensão da técnica RVNL (v_{rvnl}), diferença entre a corrente i_a e a corrente limiar I_M ($i_{a,dif}$); (d) tensão de referência antes da técnica RVNL ($v_{a,ref}$), tensão de referência com a técnica RVNL ($v_{a,ref}^*$).

Quando a tensão do PCC v_a possui um afundamento de tensão, conforme mostra a Figura 7.a, a corrente de saída do DSTATCOM i_a aumenta para compensar o afundamento da tensão do PCC.

Assim que a corrente i_a ultrapassa o valor limite de corrente definido por I_G , a técnica RVNL começa a atuar, conforme é apresentado na Figura 7.b. A subtração de i_a pelo valor saturado $i_{a,lim}$ deixa de ser um valor nulo, compondo o sinal de diferença $i_{a,dif}$, conforme a Figura 7.c. Esta diferença de corrente é multiplicada pela constante K_{RV} e o sinal v_{rvnl} é subtraído do sinal de referência $v_{a,ref}$, gerando um novo sinal de referência que limita a corrente de saída $v_{a,ref}^*$, como mostra a Figura 7.d.

Para projetar o ganho K_{RV} da técnica RVNL é necessário especificar o valor limiar de corrente I_G e a corrente máxima de saída I_M . A corrente I_G é valor de corrente para o qual a RVNL começa a atuar, ou seja, quando a corrente de saída é inferior ao valor I_G a técnica RVNL não está ativa e, para correntes de saída superiores haverá a presença da resistência virtual. A corrente I_M representa o valor máximo admissível na saída do DSTATCOM de forma a proteger a integridade dos semicondutores do inversor. A maior variação de tensão de saída é adotada como sendo o valor de pico a pico da tensão nominal de fase V_{pk-pk} . Dessa forma, é garantida a limitação de corrente em condições de curto circuito na saída do DSTATCOM e a corrente de saída do DSTATCOM é limitada a valores entre I_G e I_M . Sendo assim, o valor de K_{RV} é projetado utilizando a equação (3):

$$K_{RV} = \frac{V_{pk-pk}}{I_M - I_G} \quad (3)$$

O valor de v_{rvnl} é escrito como:

$$v_{rvnl} = (i_a - i_{a,lim}) \cdot K_{RV} \quad (4)$$

e a referência de tensão de saída, com a atuação da técnica RVNL, é dada por:

$$v_{ref}^* = E_{sen}(\omega, t + \theta) + E_{cc} - v_{rvnl} \quad (5)$$

C. Princípio de Operação da Técnica RVNL para Condições de Curto-circuito

Para manter o DSTATCOM operando mesmo em condição de curto-circuito ou de falta, uma variação dinâmica do valor limiar de corrente (I_G) pode ser adotada e, com isso, é possível forçar a corrente de saída a zero. A vantagem dessa variação dinâmica de I_G é a manutenção da regulação da tensão do barramento c.c. em seu valor nominal, diminuindo o tempo de reestabelecimento da tensão do PCC em relação a uma eventual reenergização do DSTATCOM.

A Figura 8 apresenta três situações de operação do DSTATCOM com a técnica RNLV proposta. Na região I, apresentada na Figura 8.a, tem-se a condição normal de operação, onde a corrente do DSTATCOM está abaixo do valor de limiar de corrente I_{G1} e nenhuma resistência virtual é aplicada. A região II, desta mesma figura, mostra a limitação da corrente de saída proporcionada pela técnica RVNL, a qual é ativada quando a corrente do conversor alcança o limiar I_{G1} . A região III, na Figura 8.b, exemplifica a variação dinâmica de I_G , sendo I_{G0} o valor limiar de corrente em condição de

curto-circuito. A constante K_{RV} define a inclinação da reta, que

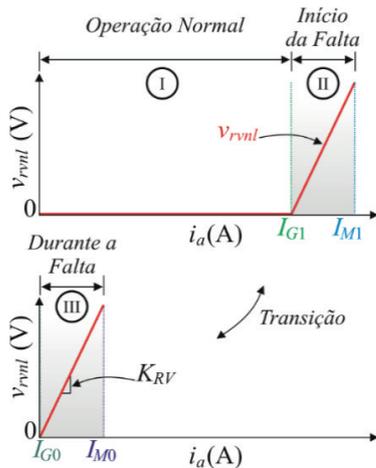


Fig. 8. Variação dinâmica de I_{G1} para $I_{G0} = 0$, para manutenção da energia do barramento c.c. durante curto-circuito no PCC.

se mantém para ambas as condições de corrente limiar.

Durante situações de falta, a técnica de RVNL limita o valor máximo instantâneo da corrente de saída do DSTATCOM. Essa limitação provoca achatamento na forma de onda da corrente, aumentando a distorção harmônica total da forma de onda da tensão do PCC, podendo exceder os valores de referência de QEE especificados pelo PRODIST. Contudo, conforme os procedimentos de rede do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), a medição da distorção harmônica de tensão não se aplica a fenômenos transitórios ou de curta duração que resultem em injeção de correntes harmônicas [23].

D. Implementação da Técnica RVNL

O fluxograma que descreve a operação da RVNL é mostrado na Figura 9.

Durante a operação normal do DSTATCOM, com V_{PCC} entre 0,80 pu e 1,10 pu, o limite máximo de corrente $i_{a,max,ref} = I_{G1}$ é mantido.

Em condições de subtensão na rede, quando a tensão eficaz corrigida é menor que 0,80 pu, ou sobretensão, com tensão eficaz maior que 1,10 pu, o RVNL identifica a tensão do PCC e altera o limite do valor de corrente de saída, passando para aproximadamente $i_{a,max,ref} = I_{G0}$ permanecendo ligado e pronto para voltar a operar. Quando a tensão da rede for menor que 0,10 pu ou maior que 1,25 pu, o PWM (Pulse Width Modulation) é bloqueado $Bloq_{PWM} = 1$ e o DSTATCOM é desligado visando a proteção dos seus componentes.

Após a condição de falta, em que o nível da tensão eficaz do PCC retorna a um nível maior que 0,80 pu, o DSTATCOM verifica o sincronismo com a rede, o cruzamento da tensão de referência por zero e então eleva o limite da corrente de saída $i_{a,max,ref} = I_{G1}$ e habilita o PWM de saída $Bloq_{PWM} = 0$.

IV. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Para a validação da técnica de RVNL, a mesma foi aplicada a um protótipo de um DSTATCOM controlado em tensão. A Figura 10 apresenta o protótipo implementado, onde o sistema

de controle e a técnica de RVNL são implementados de forma analógica, enquanto os sinais de referência são gerados em um DSP. O estágio de potência é constituído de um inversor meia ponte trifásico a quatro fios com filtro LC de saída com os parâmetros listados na Tabela I. Os ensaios foram realizados utilizando resistências e indutâncias em série com a rede de alimentação, de forma a impor um valor conhecido e adequado de impedância de linha para gerar as distorções nas tensões com as cargas e a potência disponível para o ensaio.

A técnica RVNL apresenta dois valores de corrente: limiar e máximo. O valor de corrente limiar é o valor no qual a técnica RVNL começa a atuar sobre o DSTATCOM, impondo um sinal a ser somado na tensão de referência. O valor máximo, é o valor projetado para a máxima corrente de saída.

Tabela I
Parâmetros do DSTATCOM

Parâmetro	Descrição	Valor
S_o	Potência nominal	10 kVA
V_o	Tensão nominal do barramento c.c.	800 V
V_r	Tensão eficaz de fase	220 V
f_r	Frequência da rede	60 Hz
f_s	Frequência de comutação	20 kHz
C_o	Capacitância do barramento c.c.	3,5 mF
C_f	Capacitância do filtro de saída	47 μ F
L_f	Indutância do filtro de saída	1.120 μ H
R_r	Resistência da rede	0,75 Ω
L_r	Indutância da rede	2,66 mH
I_{G1}	Corrente limiar	± 7 A/ ± 10 A
I_M	Corrente máxima	± 15 A/ ± 18 A
k_{rv}	Ganho da resistência virtual	38,87 V/A
R_L	Carga Leve	56 Ω
R_P	Carga Pesada	18,7 Ω

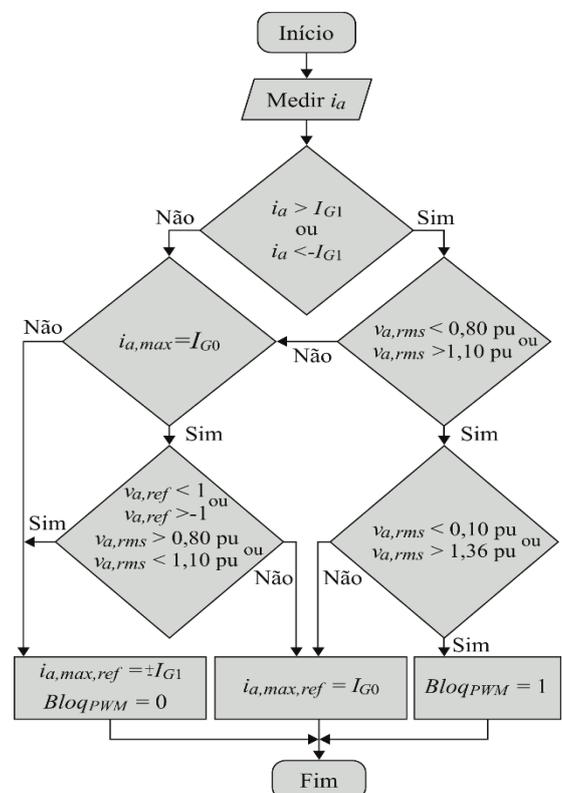


Fig. 9. Fluxograma lógico dos estados de operação durante distúrbios de tensão.

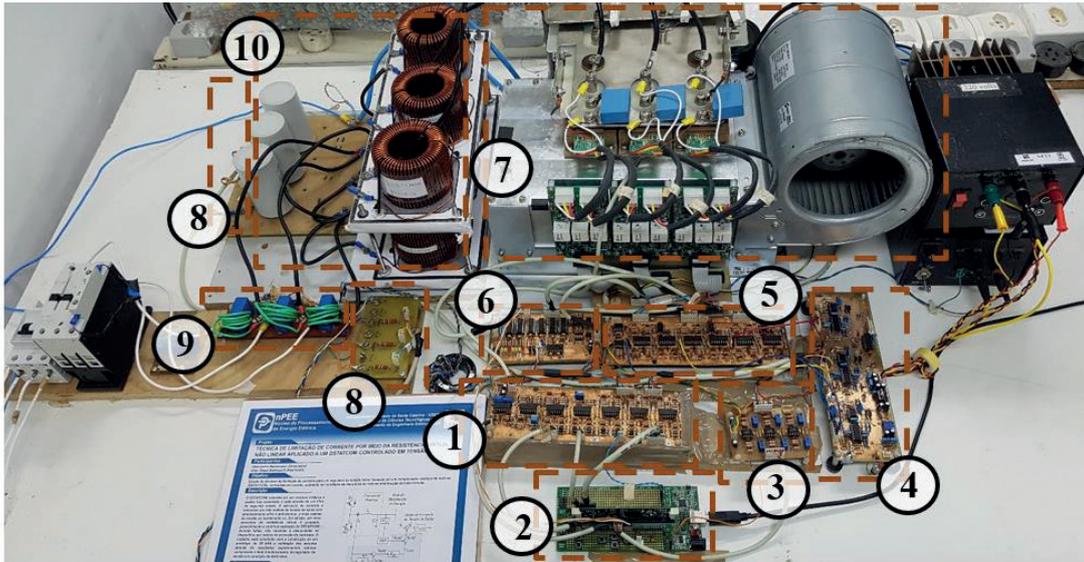
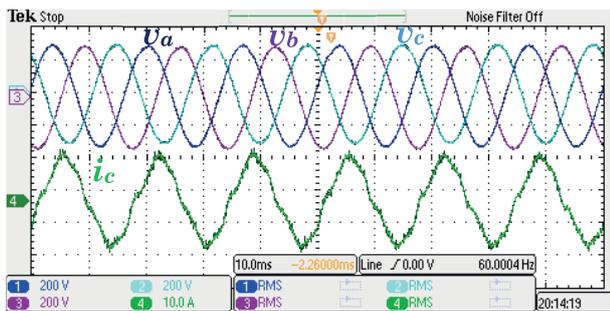


Fig. 9. Protótipo implementado. 1 – Condicionamento de tensão e corrente, 2 – DSP, 3 – conversão digital analógica, 4 – técnica RNLV, 5 – controle e modulação, 6 – circuitos de proteção, 7 – inversor, 8 – sensores de tensão, 9 – sensores de corrente.

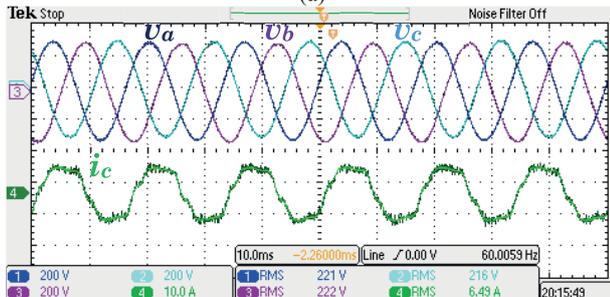
Esses valores foram estipulados para demonstrar o funcionamento da técnica de RVNL, sendo utilizados 2 valores para a corrente de limiar e 2 valores para a corrente máxima, visando a comprovação do funcionamento da técnica proposta em condições diferentes. Destaca-se ainda que todos os valores estão abaixo do limite do equipamento.

A Figura 11.a traz as formas de onda das tensões do PCC e da corrente do conversor da fase C em regime permanente, operando com a carga pesada com a técnica RVNL desabilitada. As tensões possuem baixa Distorção Harmônica Total – DHT (1,59%), enquanto o valor de pico da corrente da fase C é de 17 A, valor que excede tanto o valor limiar quanto o valor máximo estipulado para a técnica atuar.

Com a habilitação da técnica RVNL, a Figura 11.b apresenta as formas de onda das tensões do PCC e da corrente do conversor da fase C. Verifica-se um aumento da DHT de tensão (2,29%) e o valor de pico da corrente da fase C ficou limitado a 9 A de pico, dentro da faixa de operação estipulada, acima do valor limiar de 7 A e abaixo do valor máximo de 15 A. Observa-se que a elevação de DHT de tensão era esperada, entretanto este valor está abaixo dos limites impostos pelas normas IEC e IEEE 519. Além disso, salienta-se em um conversor sem a técnica de limitação de corrente ultrapassar o limite de corrente poderia proporcionar o desligamento ou, até mesmo, danificar o conversor.



(a)



(b)

Fig. 10. Formas de onda das tensões no PCC (v_a , v_b , v_c) e da corrente na fase C (i_c) em regime permanente com carga pesada e a técnica RVNL (a) desabilitada e (b) habilitada. $I_{G1} = \pm 7$ A.

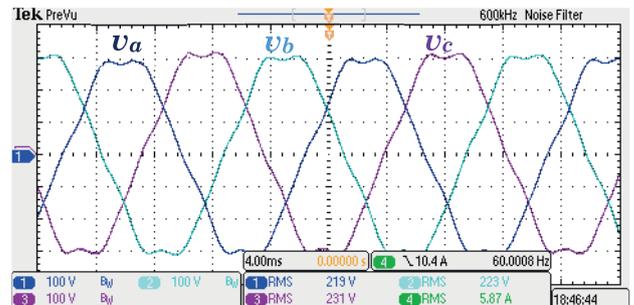


Fig. 11. Formas de onda das tensões do PCC (v_a , v_b , v_c) com o DSTATCOM desabilitado.

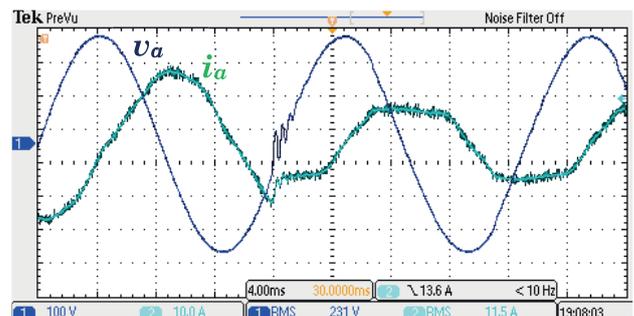


Fig. 12. Detalhe da transição das formas de onda de tensão e corrente durante a habilitação da técnica de RVNL. $I_{G1} = \pm 10$ A.

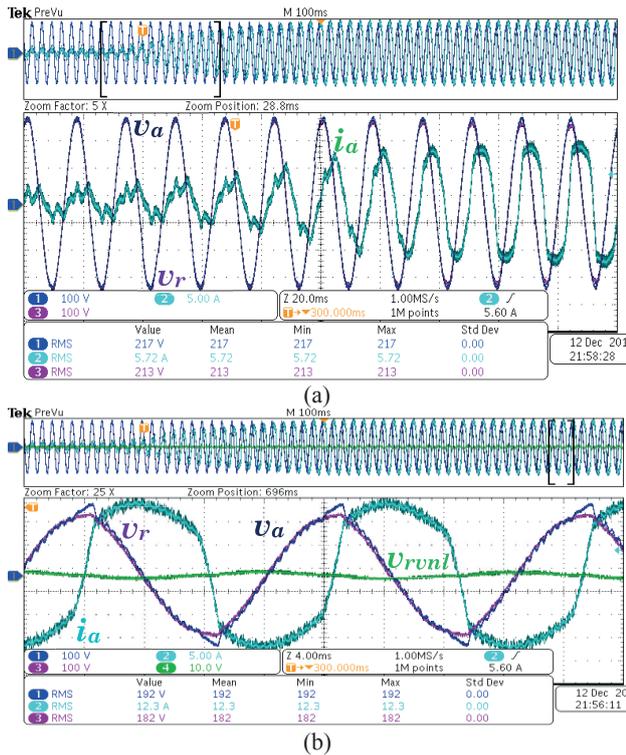


Fig. 13. Técnica RVNL durante afundamento de tensão. Em (a) destaque para o início do ensaio com a técnica RVNL começando a operar e em (b) detalhe para a operação da técnica RVNL. $I_{G1} = \pm 10$ A.

Caso o DSTATCOM seja desconectado, as tensões do PCC não são mais compensadas, conforme mostra a Figura 12, possuindo maior desequilíbrio e distorções harmônicas (da ordem de 8%), corroborando com a necessidade de manter o DSTATCOM ativo na maior faixa de operação possível.

A Figura 13 mostra o detalhe da transição da forma de onda da tensão da fase A e de corrente de saída no instante que a técnica de RVNL é habilitada. É possível notar que há uma leve distorção na forma de onda de tensão em decorrência da atuação da técnica de RVNL.

Para simular um afundamento de tensão, a tensão da rede foi reduzida gradativamente de 220 V para 180 V com a atuação do DSTATCOM com carga leve. O DSTATCOM aumenta o valor eficaz de corrente conforme a tensão da rede diminui até que a corrente atinja o valor limiar de corrente. A técnica RVNL, então, inicia sua atuação, limitando a corrente de saída do conversor e atenuando a tensão do PCC, como visto na Figura 14.

A Figura 15.a apresenta o transitório das formas de onda de tensão no PCC e da corrente de saída, juntamente com o sinal de referência v_{ref}^* impondo corrente nula na saída do DSTATCOM. O detalhe da forma de onda no momento da imposição de corrente zero é mostrado nas Figuras 15.b e 15.c mostra o transiente de corrente assim que a imposição de corrente nula é desabilitada. Os sinais de controle gerados pela técnica de RVNL são ilustrados na Figura 16.

Os sinais de controle gerados pela técnica RVNL são mostrados na Figura 17.a. Nessa etapa, a técnica RVNL está habilitada, porém a corrente de saída está abaixo do valor limiar. Então, a RVNL não altera a referência de tensão, como apresentado na Figura 17.b. Nesta figura, verifica-se que v_{ref} é

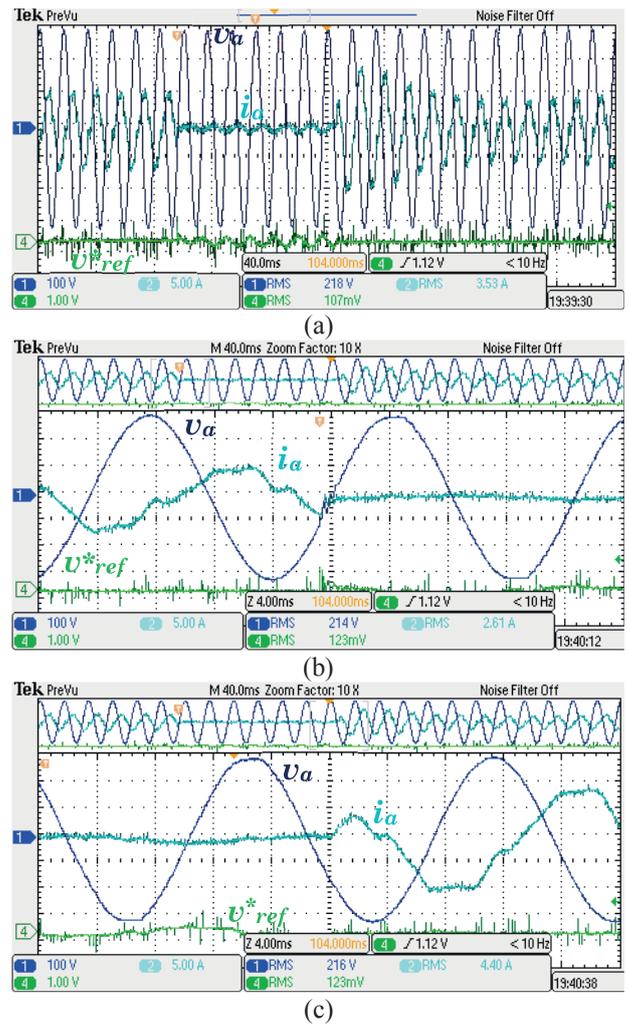


Fig. 14. Formas de onda de tensão do PCC e corrente de saída da técnica RVNL impondo corrente zero na saída do DSTATCOM (a) transitório, (b) detalhe na imposição de corrente zero e (c) detalhe na imposição da corrente de saída. $I_{G0} = \pm 0$ A.

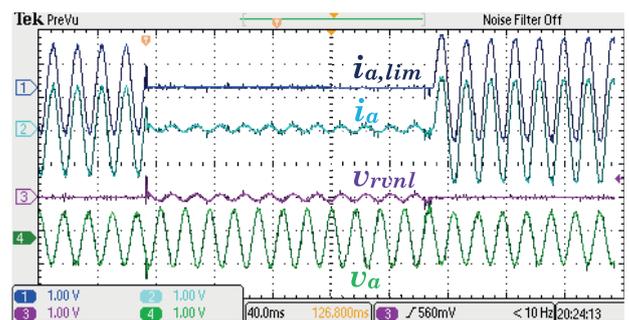


Fig. 15. Sinais de controle da técnica RVNL impondo corrente zero na saída do DSTATCOM. Tensão da fase A, corrente da fase A do DSTATCOM, corrente de fase A saturada e sinal de controle da técnica RVNL. $I_{G0} = \pm 0$ A.

igual a v_{ref}^* , uma vez que a corrente i_a não atinge a saturação, portanto, não há influência da RVNL.

Quando o valor de corrente ultrapassa o valor limiar, o sinal de corrente i_a é saturado ($i_{a,lim}$) e a diferença amplificada v_{rnl} é subtraída da referência de tensão v_{ref} gerando a nova referência de tensão v_{ref}^* , conforme ilustrado na Figura 18.

CONCLUSÃO

Esse artigo apresentou uma técnica de limitação da corrente de saída de um regulador de tensão controlado em tensão. A técnica empregada é baseada em Resistência Virtual Não Linear, alterando a tensão aplicada ao PCC conforme a corrente de saída tenda a valores danosos ao equipamento.

Ensaio realizado em uma bancada de testes de 10 kVA demonstram a capacidade de manutenção da corrente de saída dentro dos limites seguros, tanto em operação normal quanto em afundamentos da rede elétrica.

Foi verificado que durante a operação da Resistência Virtual Não Linear há deterioração da qualidade da tensão do PCC (DHT de 1,6 % para 2,3 %). Entretanto, quando comparado com a desconexão do regulador de tensão (DHT de 8 %), essa distorção pode ser considerada pequena e de baixa relevância.

A técnica é capaz, também, de manter a corrente de saída nula quando da falta da rede, garantindo assim a manutenção da energização do DSTATCOM e, por consequência, a pronta retomada da regulação de tensão assim que a rede é recomposta.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), à Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Estado de Santa Catarina (FAPESC), à Fundação Instituto Tecnológico de Joinville (FITEJ), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) pelo apoio financeiro e a empresa WEG pelo incentivo ao aperfeiçoamento técnico e ao desenvolvimento pessoal de seus colaboradores.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] L. C. Q. d. M. Silva, L. R. Limongi, F. Bradaschia e M. C. Cavalcanti, “Filtro Híbrido de Potência Baseado no Inversor Seis-Chaves para Compensações de Harmônicos e Potência Reativa em Cargas Não-Lineares e Desbalanceadas”, *Eletrônica de Potência*, vol. 24, nº 4, pp. 434-447, Dez. 2019.
- [2] ANEEL, PRODIST – Procedimento de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional, Módulo 8 - Qualidade da Energia Elétrica, Agência Nacional de Energia Elétrica, 2018.
- [3] A. C. Borré, A. S. Xavier, F. G. C. Ribeiro e M. Aredes, “Análise comparativa entre o controle direto e indireto de injeção de corrente em um D-STATCOM”, *Revista Eletrônica de Potência*, vol. 11, nº 2, pp. 103-110, Jul. 2006.
- [4] N. d. Silva, J. A. Pomilio e E. A. Vendrusculo, “Análise e Implementação de Filtro Ativo Híbrido de Potência”, *Revista Eletrônica de Potência*, vol. 17, nº 3, pp. 576-583, Ago. 2012.
- [5] G. Balen, A. R. Reis, H. Pinheiro e L. Schuch, “Estação de Carregamento Rápido com Elemento Armazenador de Energia e Filtro Ativo de Harmônicos para Veículos Elétricos”, *Revista Eletrônica de Potência*, vol. 24, nº 1, pp. 95-106, Mar. 2019.

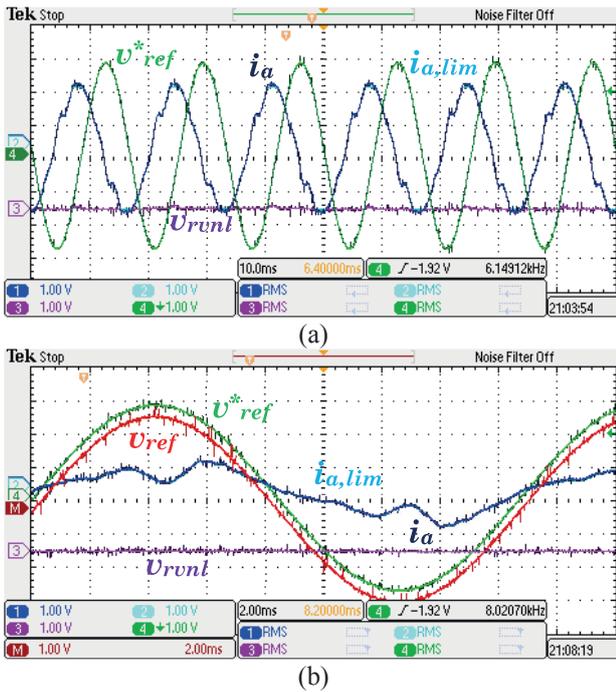


Fig. 16. (a) Tensão de referência, corrente de fase A do DSTATCOM, corrente de fase A saturada e sinal de controle da técnica RVNL. (b) Detalhe dos sinais de tensão de referência, tensão de referência com ação RVNL, corrente de fase A do DSTATCOM, corrente de fase A saturada e sinal de controle da técnica RVNL.

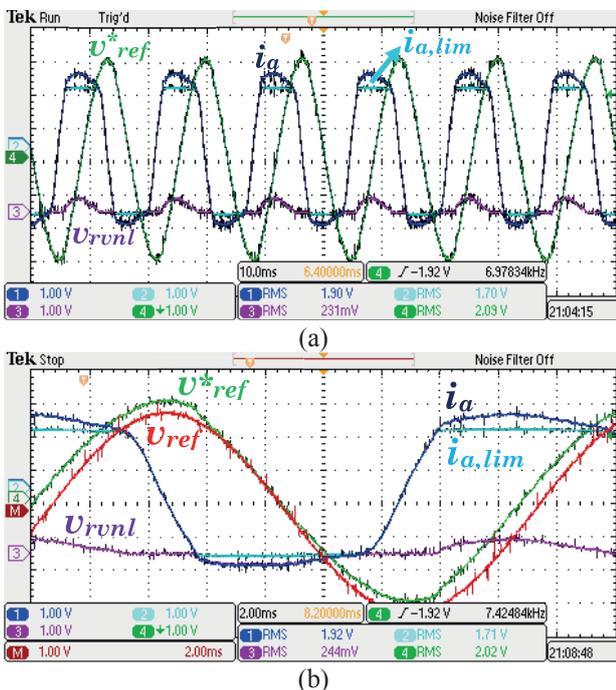


Fig. 17. (a) Tensão de referência, corrente de fase A do DSTATCOM, corrente de fase A saturada e sinal de controle da técnica RVNL. (b) Detalhe dos sinais de tensão de referência, tensão de referência com ação RVNL, corrente de fase A do DSTATCOM, corrente de fase A do DSTATCOM saturada e sinal de controle da técnica RVNL.

- [6] C. Kumar e M. K. Mishra, "A Control Algorithm for Flexible Operation of DSTATCOM for Power Quality Improvement in Voltage and Current Control Mode", in *2012 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)*, pp. 1-6, Dez. 2012.
- [7] J. C. da Cunha, R. T. Hock Jr, S. V. G. Oliveira, L. Michels, M. Mezaroba. "A novel control scheme to reduce the reactive power processed by a Multifunctional Voltage-Quality Regulator", *Electric Power Systems Research*, vol. 163, Part A, pp. 348-355, Out. 2018.
- [8] F. J. Zimann, A. L. Batschauer, M. Mezaroba, F. A. S. Neves, "Energy storage system control algorithm for voltage regulation with active and reactive power injection in low-voltage distribution network", *Electric Power Systems Research*, vol. 174, pp. 1-9, Set. 2019.
- [9] C. B. Tischer, L. G. Scherer e R. F. d. Camargo, "Topologia Híbrida Trifásica a Três Fios para Regulação de Tensão em Sistemas de Geração Baseados em Gerador de Indução Autoexcitado", *Revista Eletrônica de Potência*, vol. 20, nº 1, pp. 40-49, Fev. 2019.
- [10] G. O. Suvire, P. E. Mercado, "Improvement of Power Quality in Wind Energy Applications Using a Dstatcom Coupled With a Flywheel Energy Storage System," *Revista Eletrônica de Potência*, vol. 15, nº 3, pp. 239-246, Ago. 2010.
- [11] A. Elnady e M. M. A. Salama, "Unified Approach for Mitigating Voltage Sag and Voltage Flicker Using the DSTATCOM", *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 20, nº 2, pp. 992-1000, Abril 2005.
- [12] R. F. d. Camargo, H. A. Gründling e H. Pinheiro, "Filtro Ativo de Potência para Compensação de Harmônicos de Tensão em Sistemas de Distribuição Trifásicos a Quatro Fios", *Revista Eletrônica de Potência*, vol. 12, nº 1, pp. 63-70, Mar. 2007.
- [13] C. Kumar e M. K. Mishra, "Energy Conservation and Power Quality Improvement with Voltage Controlled DSTATCOM", in *2013 Annual IEEE India Conf. (INDICON)*, pp. 1-6, Dez. 2013.
- [14] R. T. Hock Jr, "Regulador de Tensão Móvel Controlado em Tensão com Rastreamento do Ponto de Mínima Potência Aparente", Dissertação de Mestrado, Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC, Joinville-SC, 2015.
- [15] T. P. Enderle, G. S. da Silva, C. Fischer, R. C. Beltrame, L. Schuch, V. F. Montagner e C. Rech, "D-STATCOM Applied to Single-Phase Distribution Networks: Modeling and Control", in *IECON 2012 - 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, pp. 321-326, Dez. 2012.
- [16] L. Li e X. Zhang, "Study on STATCOM Principle and Control Strategy Under Short Circuit Fault", in *2017 IEEE Int. Conf. on Mechatronics and Autom. (ICMA)*, pp. 1187-1191, Ago. 2017.
- [17] Y. Zhu, B. Liu, F. Wang, F. Zhuo e Y. Zhao, "A Virtual Resistance Based Reactive Power Sharing Strategy for Networked Microgrid", in *9th International Conference on Power Electronics (ECCE Asia)*, pp. 1564-1572, Jun. 2015.
- [18] L. Ruiming e W. Shengtie, "Power Distribution of Parallel Converters in Islanded Microgrid Using Virtual Resistance Droop Control", in *13th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*, pp. 1671-1675, May./Jun. 2018.
- [19] Y. Jiang, Y. Yang, S. Tan e S. R. Hui, "Adaptive Current Sharing of Distributed Battery Systems in DC Microgrids Using Adaptive Virtual Resistance-Based Droop Control", in *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, pp. 4262-4267, Out. 2019.
- [20] A. D. Maffezzoli; R. T. Hock Jr; F. J. Zimann; A. L. Batschauer, "Técnica de Limitação de Corrente por Meio de Resistência Virtual Não Linear Aplicado a um DSTATCOM Controlado em Tensão", in *Congresso Brasileiro de Automática (CBA2018)*, vol 1, 2018.
- [21] A. Visioli, "Modified Anti-windup Scheme for PID Controllers", in *IEE Proceedings - Control Theory and Applications*, vol. 150, nº 1, pp. 49-54, April 2003.
- [22] A. S. Hodel e C. E. Hall, "Variable-Structure PID Control to Prevent Integrator Windup," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 48, nº 2, pp. 442-451, April 2001.
- [23] ONS, Procedimentos de Rede - Submódulo 2.8: Gerenciamento dos indicadores de qualidade da energia elétrica da Rede Básica, Operador Nacional do Sistema Elétrico, 2017.

DADOS BIOGRÁFICOS

Allan Diego Maffezzoli nasceu em Jaraguá do Sul, Brasil, em 1986. Recebeu os títulos de graduação (UNISOCIESC) e mestrado (UDESC) em engenharia elétrica, Joinville-SC, Brasil, em 2014, 2019, respectivamente. Desde 2014, ele é Projetista de Hardware no departamento de desenvolvimento de produtos da empresa WEG Drives & Controls, atuando nos projetos de conversores para aerogeradores (WCW1300), Soft-Starter (SSW7000) e inversores multiníveis de média tensão (MVW-01). Seus campos de interesse incluem energias renováveis, conversores multiníveis, filtros ativos e qualidade de energia.

Rubens Tadeu Hock Júnior nascido em Joinville, SC, é engenheiro eletrícista (2013), mestre (2015) e doutor (2020) pela Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC. Suas áreas de interesse são: Conversores Estáticos, Qualidade do Processamento da Energia Elétrica, Sistemas de Controle e Conversores Multiníveis Modulares.

Alessandro Luiz Batschauer nasceu em Balneário Camboriú, Brasil, em 1977. Recebeu os títulos de graduação, mestrado e doutorado em engenharia elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis-SC, Brasil, em 2000, 2002, and 2011, respectivamente. Desde 2002, ele é professor no departamento de engenharia elétrica da Universidade do Estado de Santa Catarina. Em 2004, ele foi co-fundador da empresa SUPPLIER, Joinville, Brasil. Desde 2019 ele é tesoureiro da revista Eletrônica de Potência. Seus campos de interesse incluem conversores multiníveis, filtros ativos qualidade de energia e comutação suave. Atualmente Dr. Batschauer é membro Senior da IEEE e membro da SOBRAEP.