

# TÉCNICA DE LIMITAÇÃO DE CORRENTE POR MEIO DA RESISTÊNCIA VIRTUAL NÃO LINEAR APLICADO A UM DSTATCOM CONTROLADO EM TENSÃO

ALLAN DIEGO MAFFEZZOLLI\*, RUBENS TADEU HOCK JR\*, FELIPE JOEL ZIMANN\*, ALESSANDRO LUIZ BATSCHAUER\*

\* Núcleo de Processamento de Energia Elétrica – NPEE

Departamento de Engenharia Elétrica – DEE

Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC

Rua Paulo Malschitzki, 200, 89219-710, Joinville, Santa Catarina

Emails: diegomaffezzolli@gmail.com, rubenshockjr@gmail.com, felipezimann@ieee.org, alessandro.batschauer@udesc.br

**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. 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 logic of operating states during disturbances is introduced by varying the current limits or by blocking the PWM. Simulation results show the ability of the proposed technique to operate for several conditions of disturbances network.

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

**Resumo** — Compensadores de reativos controlados em tensão operando em redes de distribuição de energia estão suscetíveis a distúrbios (afundamentos, elevações, surtos, interrupções e curto-circuitos), assim, é possível que estes venham a processar correntes elevadas, podendo levar a seu desligamento, ou mesmo, torná-los inoperantes. Esse trabalho apresenta um novo conceito de Resistência Virtual Não Linear aplicado a um DSTATCOM controlado em tensão. A técnica limita a potência de saída do conversor, através 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. Uma lógica dos estados de operação durante os distúrbios é apresentada, variando os limites de corrente ou bloqueando o PWM. Resultados de simulação mostram a capacidade de operação da técnica proposta para diversas condições de distúrbios da rede.

**Palavras-chave** — Limitação de Corrente, Resistência Virtual Não Linear, Regulação de Tensão, DSTATCOM, Distúrbios da rede, Afundamento, Elevação.

## 1 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. O Módulo 8 do PRODIST estabelece limites e valores de referência para adequação da qualidade de energia fornecida à seus consumidores (ANEEL, 2018).

O compensador estático de reativos de distribuição (*Distribution Static Compensator* – DSTATCOM) pode ser utilizado para solucionar os problemas de qualidade de energia apresentados. A solução envolve conectar o DSTATCOM em derivação com ponto de conexão comum (PCC) e controlar diretamente a magnitude, o ângulo de fase e a frequência da tensão do PCC (Borré et al., 2006).

O DSTATCOM possui diversos modos de controle que são divididos em duas estratégias principais: o controle em corrente e o controle em tensão. A correção do fator de potência, a filtragem

ativa de componentes harmônicas e a regulação da tensão eficaz no PCC são algumas das técnicas de controle em corrente encontradas na literatura (da Cunha, 2015; Zimann, 2016). Neste modo de controle encontra-se uma característica importante que é a limitação da corrente de saída efetuada de forma natural. Isso deixa o conversor imune aos efeitos nocivos de uma situação de curto-círcito, onde elevadas correntes circulam pelo sistema. Entretanto, este modo de controle não atua sobre os distúrbios de tensão encontrados em situações de funcionamento anormal do sistema, como mostrado na Figura 1.

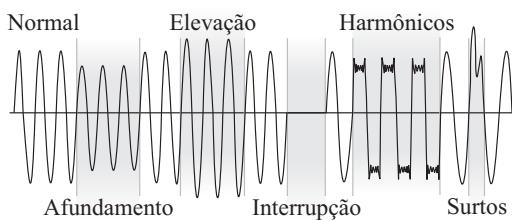


Figura 1. Distúrbios de tensão encontrados na rede elétrica.

Em da Cunha (2015) é proposta a regulação da tensão eficaz e a mitigação das harmônicas da tensão no PCC por meio de controle em cascata. São utilizadas duas malhas de controle, uma malha interna responsável pelo controle de corrente e uma malha externa responsável pelo controle da tensão eficaz. O tempo necessário para restauração da amplitude de tensão do PCC é lento, da ordem de ciclos de rede.

Outras técnicas propostas para eliminação de harmônicas são baseadas na geração de referências através de lógica *fuzzy* (Arya & Singh, 2014) e redes neurais (Prajapati & Sharma, 2014). Em ambas as técnicas a implementação é complexa, e no quesito regulação da tensão com baixa distorção, apresentam desempenho inferior quando comparados ao modo de controle de tensão (Hock Jr et al., 2014).

Em Elnady & Salama (2005) é proposto o uso do filtro de Kalman para detecção e atuação em uma condição de afundamento de tensão. Apesar da técnica de controle avançada, os resultados apresentam um tempo de resposta lento quando a tensão é reestabelecida. Esse efeito provoca um elevação na tensão de fornecimento, podendo ser danoso ao conversor e à outros elementos conectados a rede, como cargas e alimentadores.

Ao operar em modo de controle de tensão, o DSTATCOM impõe uma tensão controlada no PCC. Ao impor a tensão, o conversor atua na circulação da corrente reativa no sistema e mantém o valor eficaz da tensão no PCC regulado. Deste modo, o DSTATCOM é visto pelo sistema como um caminho de baixa impedância, o que resulta no desvio das componentes harmônicas da corrente da fonte, deixando o sistema livre de distorções. (Kumar & Mishra, 2013).

No modo de controle de tensão, o DSTATCOM protege as cargas críticas dos distúrbios de tensão, pela imposição de tensão ao PCC. No entanto, a corrente processada por ele é consequência do sistema a qual este está conectado, assim, é possível que ele venha a processar correntes elevadas durante os distúrbios, podendo torná-lo inoperante.

Em Enderle et al. (2012) é efetuada a proteção do DSTATCOM através de seu desligamento, quando detectado um valor elevado de corrente. Contudo, esta solução não visa proteger as cargas críticas conectadas ao PCC. Em Li & Zhang (2017) é proposto o controle indireto de corrente de curto-circuito variando o índice de modulação quando detectado uma variação brusca da tensão do barramento CC e do ângulo  $\delta$ . Tal técnica impõe uma variação permanente nos sinais de controle, o que não é desejado. Em Kumar & Mishra (2012) é proposta a variação dos modos de controle de tensão para o modo de controle de corrente após receber um sinal externo de falta. Através dos resultados apresentados, foram observados

que podem ser gerados picos de corrente e surtos de tensão durante a transição dos modos de controle, gerando instabilidade para o controle.

Tendo em vista as características das técnicas encontradas na literatura, este artigo propõe a utilização do conceito de Resistência Virtual Não Linear (RVNL) para efetuar o controle indireto da corrente quando utilizado o modo de controle de tensão em DSTATCOMs. A técnica limita a corrente de saída do conversor durante os distúrbios de tensão, protegendo o DSTATCOM e as cargas críticas conectadas ao PCC. A implementação da técnica é simples e não requer um reprojeto das malhas de controle existentes em um DSTATCOM controlado em tensão. Ainda, é possível limitar correntes de um curto-círcuito trifásico no PCC se implementado com um tempo de resposta adequado.

O artigo é organizado da seguinte forma. Na Seção 2 é apresentada a topologia do conversor e as malhas de controle do DSTATCOM utilizado para validação da técnica proposta. Na Seção 3 é descrito o processo de transferência de potência entre a rede e o conversor. Na Seção 4 são descritos os detalhes da técnica RVNL proposta e são apresentados os estados da operação do conversor durante os distúrbios de tensão. Na Seção 5 são apresentados os resultados de simulação para diferentes condições de falta. Finalmente, as conclusões são apresentadas na Seção 6.

## 2 Circuito de Potência e Controle do DSTATCOM

A estrutura de potência que compõe o DSTATCOM é um conversor meia ponte trifásico à quatro fios com filtro de saída do tipo LC, como mostrado na Figura 2. Essa configuração permite a operação independente em cada uma das fases de sistema trifásico, devido à conexão do ponto central do barramento ao neutro. O conversor é conectado paralelamente as cargas, ao PCC e a rede de distribuição.

Na Figura 3 é mostrada a estrutura de controle utilizada neste artigo. A malha de tensão de saída é responsável pelo controle da forma de onda instantânea de tensão de saída do conversor. A malha de tensão total é responsável pelo controle

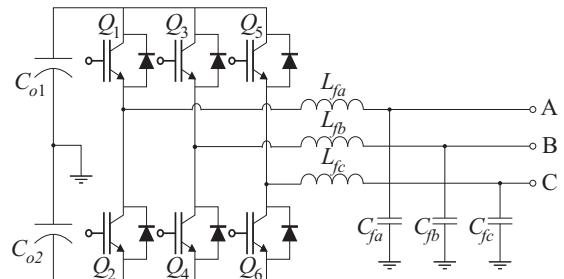


Figura 2. Circuito de potência do DSTATCOM.

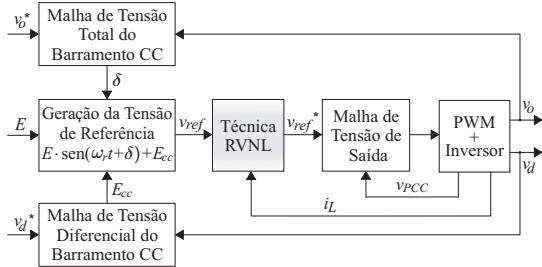


Figura 3. Diagrama de blocos do controle do DSTATCOM utilizando a técnica RVNL.

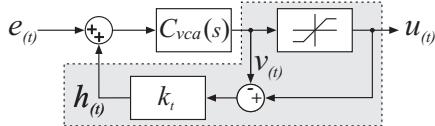


Figura 4. Técnica de *anti-windup* implementada no controlador da tensão de saída do conversor.

da tensão do barramento CC e a malha de controle diferencial mantém as tensões entre os capacitores equilibradas. No bloco de geração das tensões de referências são produzidas as formas de onda que são utilizadas para o controle da tensão de saída.

A estratégia de controle utilizada é baseada no trabalho de (Hock Jr, 2015), onde pode ser encontrado o projeto detalhado de todas as malhas de controle utilizadas. Além disso, uma técnica de *anti-windup* foi implementada no controlador da tensão de saída do conversor para melhorar a resposta dinâmica na recuperação da condição de falta, como mostrado na Figura 4.

O sinal de geração de referência é dado pela equação (1):

$$v_{ref} = E \cdot \text{sen}(\omega_r t + \delta) + E_{cc} , \quad (1)$$

onde  $v_{ref}$  é o sinal de referência da tensão de saída,  $E$  define a amplitude da tensão de pico imposta ao PCC,  $\omega_r$  é a frequência angular da rede elétrica,  $\delta$  é a diferença angular entre a tensão da rede e a tensão no PCC produzido pela malha de controle total e  $E_{cc}$  é um nível médio de pequena amplitude para regulação do barramento CC produzido pela malha de controle diferencial.

### 3 Transferência de Potência entre a Rede e o DSTATCOM

Um compensador de reativos em modo de controle de tensão é visto pelo sistema como uma fonte de tensão controlada. A transferência de potência entre duas fontes de tensão ocorre através da diferença entre as amplitudes e o ângulo das tensões de cada fonte. Nesse sistema, a amplitude e o ângulo da tensão do PCC são determinados pelas cargas, pela impedância equivalente do transformador, pela impedância dos cabos e pelo fluxo de potência ativa e reativa proveniente da fonte alimentadora. Entretanto, com a imposição

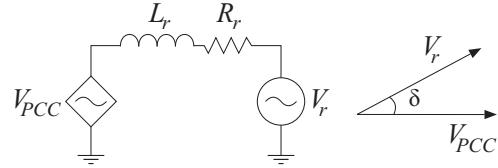


Figura 5. Circuito equivalente do conversor conectado a rede e o diagrama fasorial das tensões.

da tensão ao PCC é possível regular a tensão eficaz, além de eliminar distorções harmônicas.

Na Figura 5 é mostrado o circuito equivalente para a análise do fluxo de potência entre o conversor e a rede elétrica. Neste circuito  $V_r$  representa a tensão da fonte alimentadora,  $V_{PCC}$  representa a tensão imposta pelo DSTATCOM, e  $Z_r$  representa a impedância de rede, que é composta por uma parcela resistiva  $R_r$  e outra parcela indutiva  $L_r$ . A impedância de rede é a composição das impedâncias dos cabos e da impedância do alimentador. O diagrama fasorial das tensões é mostrado, destacando o ângulo de defasagem ( $\delta$ ) entre as tensões da fonte e do DSTATCOM.

A potência ativa que flui entre a rede e o DSTATCOM é dada majoritariamente pela defasagem  $\delta$  entre as tensões da rede e do PCC. Por outro lado, o fluxo de potência reativa é regido principalmente pelas amplitudes de  $V_r$  e de  $V_{PCC}$ .

Com a imposição da amplitude da tensão do PCC, o fluxo de potência reativa está definido e o DSTATCOM precisa ajustar o ângulo  $\delta$ , através do controle de tensão total, para平衡ar o fluxo de potência ativa proveniente da rede.

### 4 Técnica de Resistência Virtual Não Linear

A técnica de limitação da corrente de saída do DSTATCOM proposta consiste em utilizar o conceito de Resistência Virtual Não Linear (RVNL), emulando uma resistência de valor variável em série com o indutor do filtro de saída do conversor. O efeito da resistência virtual atenua a tensão na saída do conversor em condições desfavoráveis de funcionamento.

A técnica RVNL pode ser vista como uma malha externa, cuja saída é a tensão de referência do conversor, com a vantagem de que não existe um controlador de corrente. O problema em se ter um controlador de corrente em cascata com o controlador de tensão é a limitação da dinâmica do controlador de tensão, diminuindo a banda passante do DSTATCOM. Assim, a técnica RVNL não altera a banda passante do controlador de tensão e não altera a resposta dinâmica do controle em regime permanente.

#### 4.1 Aspectos Teóricos

Em condição normal de operação, em que os máximos valores de corrente não sejam alcançados

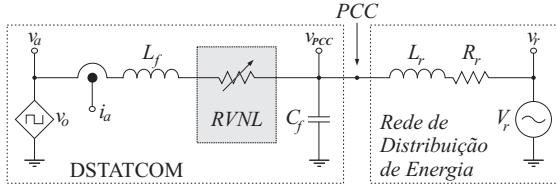


Figura 6. Representação do circuito com a técnica RVNL.

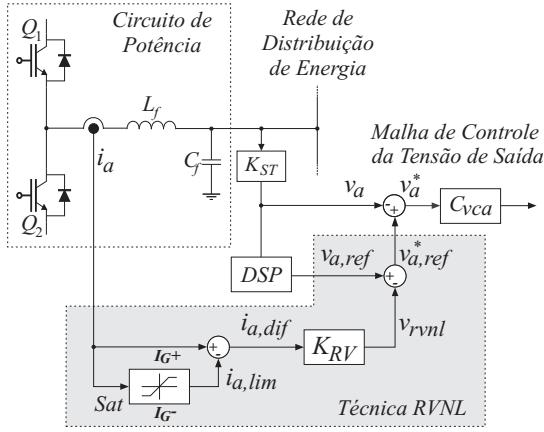


Figura 7. Diagrama de blocos da técnica RVNL.

dos, a técnica RVNL não tem efeito sobre os sinais da malha de controle de tensão. Ao exceder esse limite, o valor da resistência virtual é gradativamente elevado, o que provoca uma atenuação progressiva da tensão de saída do conversor.

Na Figura 6 é mostrado o circuito equivalente do DSTATCOM com a técnica RVNL conectado ao ponto de conexão comum e a rede elétrica.

Na Figura 7 é apresentado o diagrama de blocos que ilustra a técnica RVNL. Neste técnico o bloco *Sat* representa um saturador, sendo os limites de saturação os valores definidos de corrente de limiar  $I_G$ , ou seja,  $I_G$  é o valor de corrente para o qual a técnica RVNL emula uma resistência não nula. O bloco  $K_{RV}$  é uma constante proporcional à resistência virtual. O bloco  $K_{ST}$  é o atenuador da tensão de saída do DSTATCOM. O sinal de referência de controle ( $v_{a,ref}$ ), é gerado por um processador digital de sinal (Digital Signal Processor – DSP) através de circuitos de sincronismo com a amplitude desejada para o PCC.

Com o intuito de detalhar os sinais de controle da técnica RVNL, é apresentado na Figura 8 uma condição de afundamento de tensão da rede ( $v_a$ ), onde  $i_a$  é a corrente instantânea no indutor do DSTATCOM. O sinal de corrente  $i_a$  é subtraído por seu valor saturado  $i_{a,lim}$  resultando no sinal de diferença  $i_{a,dif}$ . O valor  $i_{a,dif}$  é multiplicado pela constante  $K_{RV}$ , sendo o resultado denominado de tensão sobre a resistência virtual não linear  $v_{rvnl}$ . O valor  $v_{rvnl}$  é subtraído da tensão de referência  $v_{a,ref}$ , resultando no sinal  $v_{a,ref}^*$ , que por sua vez é subtraído da tensão de saída do conversor  $v_a$ , resultando no sinal de erro  $v_a^*$  que vai para o controlador de tensão de saída do conversor.

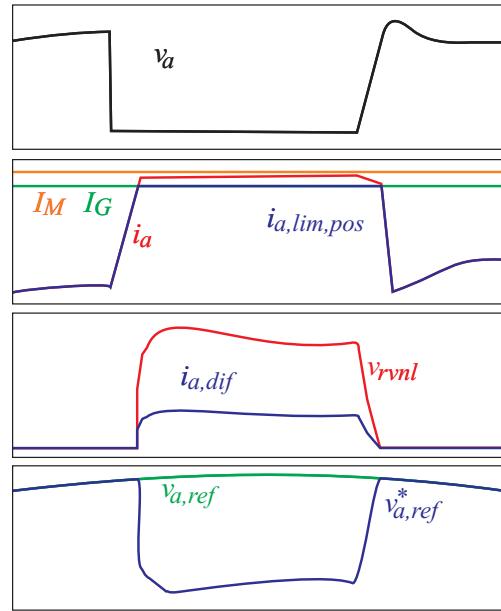


Figura 8. Tensão e corrente na saída do DSTATCOM e sinais de controle RVNL para uma condição de afundamento de tensão.

Para determinar o valor da Resistência Virtual ( $K_{RV}$ ) é necessário especificar um valor de corrente limiar ( $I_G$ ) e o valor da corrente máxima de saída ( $I_M$ ), para o qual é gerada a maior variação de tensão de saída. A maior variação de tensão de saída é o valor de pico a pico da tensão nominal de fase ( $V_{pk-pk}$ ). O valor da tensão de pico da fase garante que o DSTATCOM limite a corrente para uma condição de curto-círcuito. Assim, a corrente de saída do conversor tende a limitar-se entre os valores de  $I_G$  e  $I_M$ . O valor de  $K_{RV}$  é dado pela equação (2):

$$K_{RV} = \frac{V_{pk-pk}}{I_M - I_G} \quad (2)$$

O valor de  $v_{rvnl}$  é dado pela equação (3):

$$v_{rvnl} = (i_a - i_{a,lim}) \cdot K_{RV} \quad (3)$$

Considerando a técnica RVNL, o novo valor de tensão de referência para o controlador da tensão de saída do DSTATCOM, para uma respectiva fase, é dada pela equação (4):

$$v_{a,ref}^* = E \cdot \sin(\omega_r t + \delta) + E_{cc} - v_{rvnl} \quad (4)$$

Uma variação dinâmica pode ser implementada no limite superior ( $I_{G+}$ ) e inferior ( $I_{G-}$ ) do saturador, variando de um limite máximo de corrente para um limite mínimo, permitindo assim que em condições de curto-círcuito o DSTATCOM forneça ao PCC uma corrente próxima a zero. Como vantagem, a tensão do barramento CC se mantém regulada no valor nominal de operação, permitindo que o DSTATCOM prontamente reestabeleça a tensão do PCC assim que a falta cesse.

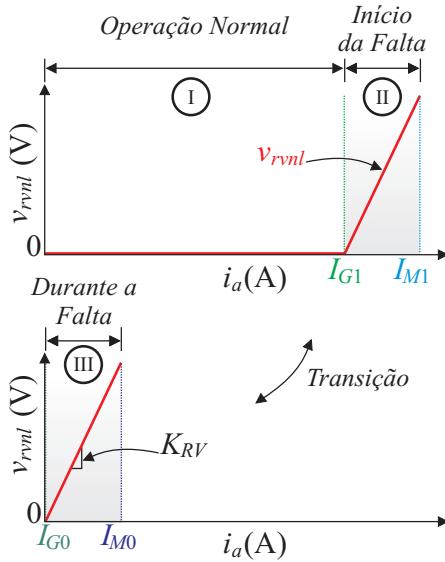


Figura 9. Variação dinâmica de  $I_{G1} = \text{MAX}$  para  $I_{G0} = 0$ .

Caso contrário, haveria o tempo de energização do equipamento a ser considerado.

A Figura 9 exemplifica a variação dinâmica, sendo  $I_{G1}$  o valor limite para a corrente em condição normal de operação, e  $I_{G0}$  o valor para atuação com valor mínimo de corrente de operação. A constante  $K_{RV}$  define a inclinação da reta, que se mantém para ambas condições de corrente limiar.

Da forma como a técnica RVNL é implementada neste trabalho, durante a falta, o controle limita o valor máximo instantâneo da corrente de saída do DSTATCOM, o que provoca um achatamento na forma de onda da corrente, comprometendo a distorção harmônica total (*Total Harmonic Distortion* – THD), logo não atendendo os valores de referência de QEE especificadas 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 (ONS, 2017). A técnica RVLN visa garantir a proteção do DSTATCOM e das cargas conectadas próximas ao PCC, manter o conversor operante durante a condição de falta e não interferir na dinâmica do controle durante a condição normal de operação.

#### 4.2 Estados de Operação Durante Distúrbios da Rede Elétrica

No presente trabalho, o sincronismo com a rede é efetuado através de um circuito de detecção de fase (*Phase-Locked Loop* – PLL) e os sinais da tensão de referência para o controle de tensão são gerados internamente no DSP. Por meio das saídas digitais do DSP é possível controlar o nível máximo de corrente de saída e bloquear/desbloquear o PWM de saída. Para efetuar esse controle é im-

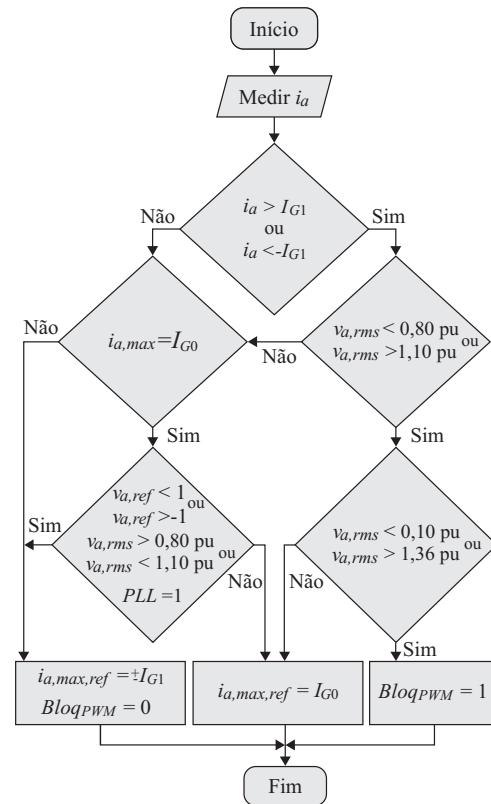


Figura 10. Fluxograma lógico dos estados de operação durante distúrbios de tensão.

plementada a lógica mostrada na Figura 10.

Durante a operação normal do DSTATCOM, com  $V_{PCC}$  entre 0,80 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 sobretenção com tensão eficaz de 1,10 pu, o RVNL identifica a tensão do e altera o limite do valor de corrente de saída, passando para aproximadamente 0 A ( $I_{a,max,ref} = I_{G0}$ ), permanecendo ligado e pronto para voltar a operar. Quando a tensão da rede for menor que 0,10 pu, o PWM é bloqueado ( $Bloq\_PWM = 1$ ) e o DSTATCOM é desligado.

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 ( $I_{a,MAX,REF} = \pm I_{G1}$ ) e habilita o PWM de saída ( $Bloq\_PWM = 0$ ).

## 5 Resultados de Simulação

O sistema e o DSTATCOM são simulados no software PSIM® com as especificações contidas na Tabela 1, foi selecionada uma carga com fator de potência de 0,8 indutivo, com 0,80 pu (24 kVA) de potência e a corrente limiar foi ajustada para 60 A.

Na Figura 11 pode-se verificar a atuação da técnica RVNL em uma condição de surto de tensão no PCC, que pode ser caracterizada como uma descarga atmosférica próxima ao PCC. As formas

de onda apresentadas em cinza são as condições sem a atuação do DSTATCOM e as formas de onda coloridas são os resultados com o DSTATCOM utilizando a técnica proposta. Sem a correção da tensão o valor da tensão de pico chega a 1,3 kV ( $v_a, v_b, v_c$  em cinza). No entanto, com a regulação da tensão no PCC, pelo DSTATCOM com a técnica de RVNL, a tensão de pico chega em 350 V ( $v_a, v_b, v_c$ ), sendo a corrente limitada em 63 A de pico ( $i_a, i_b, i_c$ ).

Na Figura 12 é mostrada uma condição de elevação de tensão. Sem correção, a tensão eficaz no PCC ( $v_a, v_b, v_c$  em cinza) passa de 0,80 pu para 1,25 pu. Com a atuação do DSTATCOM, a tensão eficaz no PCC ( $v_a, v_b, v_c$ ) mantém-se regulada em 1,01 pu. Ao limitar a corrente de saída em 65 A de pico ( $i_a, i_b, i_c$ ) a THD da tensão é comprometida, passando do valor de 0,3% para o valor de 10% de distorção.

Com o intuito de apresentar a limitação de potência de saída do DSTATCOM, utilizando a técnica RVNL, uma condição de afundamento de tensão é mostrada na Figura 13. No PCC sem correção a tensão eficaz ( $v_a, v_b, v_c$  em cinza) passa de 0,80 pu para 0,72 pu. Com correção, durante o transitório, a tensão eficaz no PCC é corrigida para 0,98 pu. Ao limitar a corrente de saída em 66 A de pico ( $i_a, i_b, i_c$ ) a THD da tensão é de 17 %.

Uma condição de afundamento de tensão mais severa é apresentada a Figura 14. No PCC sem correção, a tensão eficaz ( $v_a, v_b, v_c$  em cinza) passa de 0,80 pu para 0,43 pu. Mesmo com correção, o DSTATCOM detecta uma tensão eficaz ( $v_{a,rms}, v_{b,rms}, v_{c,rms}$ ) menor que 0,80 pu. Assim, são alterados os valores limites para correntes ( $lim_a, lim_b, lim_c$ ), ou seja, o valor da corrente limitar passa a ser 0 A. Ao limitar a corrente de saída do DSTATCOM é mantido o nível de tensão no barramento CC, caso contrário o barramento CC seria descarregado e inviabilizaria o funcionamento normal da operação.

Uma condição de interrupção de tensão é apresentada na Figura 15. Quando a tensão eficaz é menor que 0,10 pu o DSTATCOM não deve injetar energia na rede, logo, os sinais de comando são bloqueados. Os sinais de comando são restaurados após a falta, quando a tensão eficaz atinge um valor maior que 0,80 pu, com o PLL ( $v_a, v_b, v_c$ ) sincronizado com a rede ( $\omega = 377 \text{ rad/s} \pm 5\%$ ) e com a tensão de referência cruzando por zero, voltando a corrigir a tensão eficaz no PCC para o valor de referência de 1,00 pu.

A Figura 16 mostra uma condição de curto-círcuito trifásico na saída do DSTATCOM, sendo esta a pior condição para avaliar a técnica RVNL, pois a derivada de corrente é muito alta, sendo necessário que o RVNL atue quase instantaneamente. Neste caso a corrente máxima foi ajustada para 61 A. Conforme pode ser observado, as três fases passam a apresentar o mesmo nível de

Tabela 1. Parâmetros do DSTATCOM

Parâmetros	Valores
Potência nominal	$S_o = 30 \text{ kVA}$
Tensão do barramento CC	$v_o = 800 \text{ V}$
Tensão eficaz (Fase–Neutro)	$v_r = 220 \text{ V}$
Frequência da rede	$f_r = 60 \text{ Hz}$
Frequência de comutação	$f_s = 20 \text{ kHz}$
Ondulação de corrente no indutor	$\Delta I_L = 30 \%$
Capacitância do barramento CC	$C_{ox} = 3,5 \text{ mH}$
Capacitância do filtro de saída	$C_{fx} = 47 \text{ } \mu\text{F}$
Indutância do filtro de saída	$L_{fx} = 560 \text{ } \mu\text{H}$
Resistência da rede	$R_r = 1,37 \Omega$
Indutância da rede	$L_r = 3,63 \text{ mH}$
Corrente limiar	$I_{G1} = 60 \text{ A}$
Corrente máxima	$I_M = 70 \text{ A}$

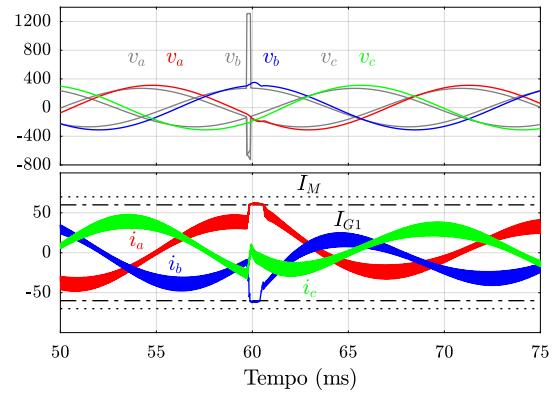


Figura 11. Surto de 1,3 kV na tensão do PCC.

tensão, estando portanto em condição de curto-círcuito. As correntes de saída do DSTATCOM são limitadas em 60 A pelo RVNL. Porém, com o decaimento da tensão eficaz, a corrente de saída é limitada para o valor mínimo próximo de 0 A.

Na Figura 17 é mostrada a operação do DSTATCOM durante uma condição de interrupção monofásica de curta duração. Na Figura 17(a) são mostrados os resultado sem a técnica RVNL e pode-se observar um grande aumento na corrente do conversor. Na Figura 17(b) são mostrados os resultado com a técnica RVNL e pode-se observar que a corrente é limitada próximo ao valor limiar de  $I_{G1}$  e  $I_M$ .

## 6 Conclusões

Esse artigo apresentou a técnica da Resistência Virtual Não Linear aplicado a um DSTACOM controlado em tensão atuando durante distúrbios de tensão da rede elétrica. Os resultados de simulação demonstram a capacidade de limitação de corrente de saída, preservando o equipamento durante distúrbios severos no sistema de distribuição. Assim, a técnica proposta RVNL passa a ser uma solução para controle indireto da corrente aplicado a conversores estáticos em modo de controle de tensão.

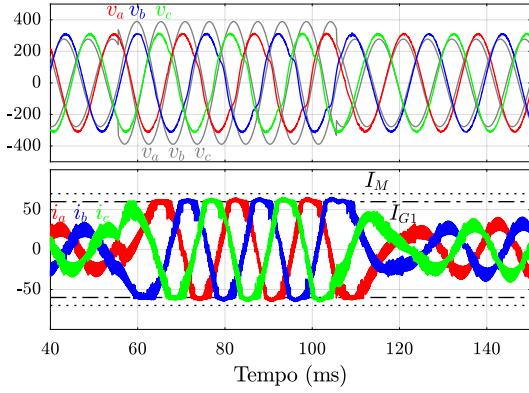


Figura 12. Elevação para 1,25 pu de tensão no PCC.

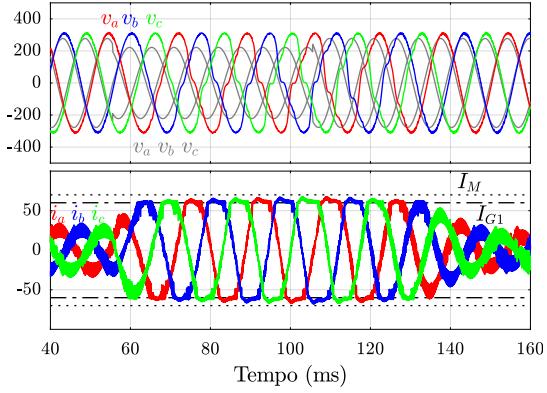


Figura 13. Afundamento para 0,72 pu de tensão do PCC.

Para a completa validação e avaliação da técnica RVNL frente a distúrbios de tensão, testes práticos se fazem necessários. Uma bancada de teste com um DSTATCOM de 30 kVA encontra-se em desenvolvimento e será utilizada para validar os resultados alcançados neste trabalho.

### 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

ANEEL (2018). *PRODIST – Procedimento de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional, Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica*, Agência Nacional de Energia Elétrica.

Arya, S. R. & Singh, B. (2014). Neural network based conductance estimation control algo-

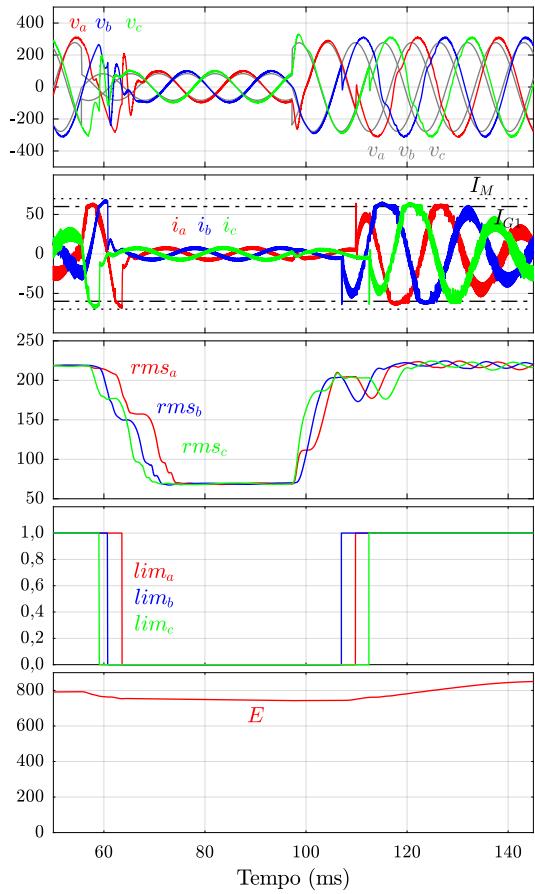


Figura 14. Afundamento para 0,43 pu de tensão no PCC.

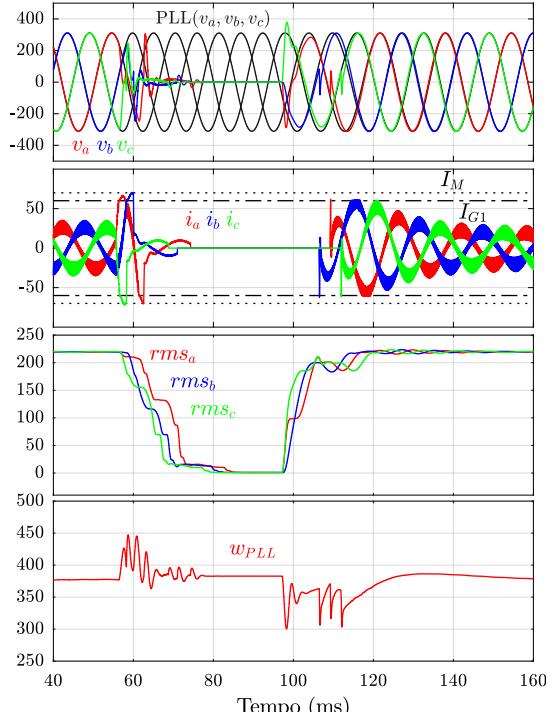


Figura 15. Interrupção de tensão por 3 ciclos de rede.

rithm for shunt compensation, *IEEE Trans. Ind. Informat.* **10**(1): 569–577.

Borré, A. C., Xavier, A. S., Ribeiro, F. G. C. &

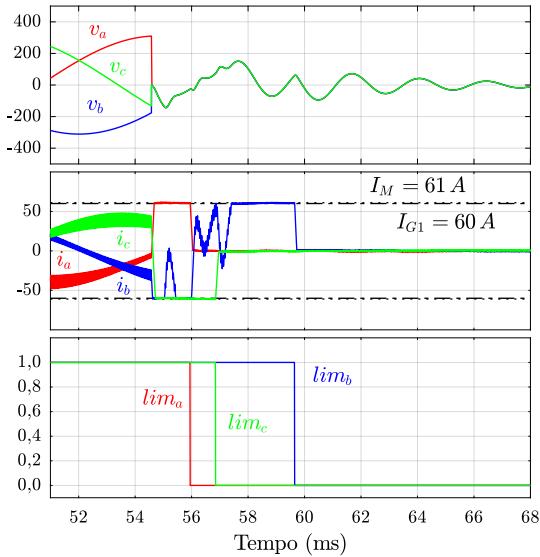
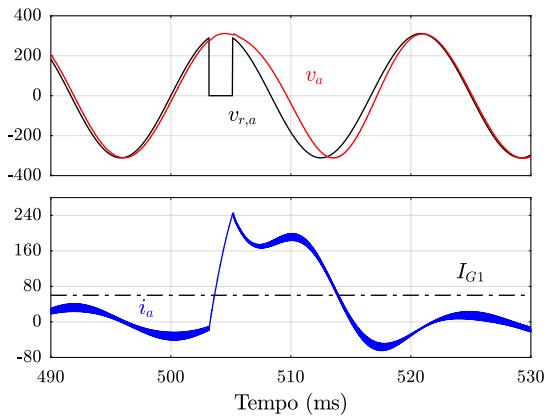
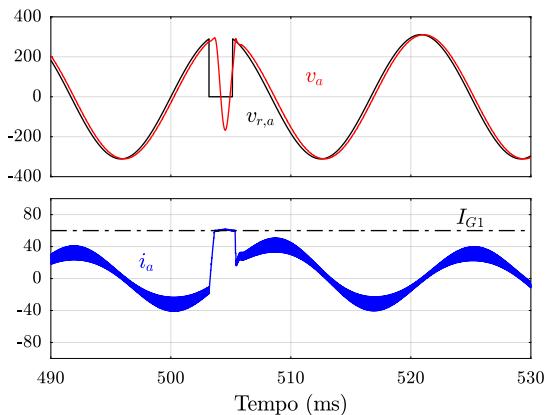


Figura 16. Condição de curto-círculo trifásico no PCC.



(a) Operação sem a técnica RVNL.



(b) Operação com a técnica RVNL.

Figura 17. Operação do DSTATCOM durante uma interrupção de curta duração.

Aredes, M. (2006). Análise comparativa entre o controle direto e indireto de injeção de corrente em um D-STATCOM, *Eletrônica de Potência* 11(2): 8.

da Cunha, J. C. (2015). *Projeto e implementação de um DSTATCOM multifuncional controlado em corrente e com mitigação de harmônicas por detecção de tensão*, Dissertação de mestrado, Universidade do Estado de Santa Catarina.

lado em corrente e com mitigação de harmônicas por detecção de tensão, Dissertação de mestrado, Universidade do Estado de Santa Catarina.

Elnady, A. & Salama, M. M. A. (2005). Unified approach for mitigating voltage sag and voltage flicker using the DSTATCOM, *IEEE Trans. Power Del.* 20(2): 992–1000.

Enderle, T. P., da Silva, G. S., Fischer, C., Beltrame, R. C., Schuch, L., Montagner, V. F. & Rech, C. (2012). D-STATCOM applied to single-phase distribution networks: Modeling and control, *IECON 2012 – 38th Annual Conf. on IEEE Ind. Electron. Soc.*, pp. 321–326.

Hock Jr, R. T. (2015). *Regulador de tensão móvel controlado em tensão com rastreamento do ponto de mínima potência aparente*, Dissertação de mestrado, Universidade do Estado de Santa Catarina.

Hock Jr, R. T., de Novaes, Y. R. & Batschauer, A. L. (2014). Estrutura de controle de um regulador de tensão móvel com rastreador de mínima potência, *XX Congresso Brasileiro de Automática* pp. 3314–3121.

Kumar, C. & Mishra, M. K. (2012). A control algorithm for flexible operation of DSTATCOM for power quality improvement in voltage and current control mode, *2012 IEEE Int. Conf. on Power Electron., Drives and Energy Syst. (PEDES)*, pp. 1–6.

Kumar, C. & Mishra, M. K. (2013). Energy conservation and power quality improvement with voltage controlled DSTATCOM, *2013 Annual IEEE India Conf. (INDICON)*, pp. 1–6.

Li, L. & Zhang, X. (2017). Study on STATCOM principle and control strategy under short circuit fault, *2017 IEEE Int. Conf. on Mechatronics and Autom. (ICMA)*, pp. 1187–1191.

ONS (2017). *Procedimentos de Rede – Submódulo 2.8: Gerenciamento dos indicadores de qualidade da energia elétrica da Rede Básica*, Operador Nacional do Sistema Elétrico.

Prajapati, R. & Sharma, S. (2014). Fuzzy logic controller based distribution static compensator, *Electron. and Comput. Sci. (SCE-ECS)*, *2014 IEEE Students' Conf. on Elect.*, pp. 1–6.

Zimann, F. J. (2016). *Sistema de controle de potência ativa e reativa para a regulação de tensão em redes de distribuição de baixa tensão*, Dissertação de mestrado, Universidade do Estado de Santa Catarina.