

ESTRUTURA DE CONTROLE DE UM REGULADOR DE TENSÃO MÓVEL COM RASTREADOR DE MÍNIMA POTÊNCIA

RUBENS T. HOCK JR., YALES R. DE NOVAES, ALESSANDRO L. BATSCHAUER

NÚCLEO DE PROCESSAMENTO DE ENERGIA ELÉTRICA - NPÉE, DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA,
UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA - UDESC
RUA PAULO MALSCHITZKI S/N, CEP 89219-710, JOINVILLE, SANTA CATARINA
RUBENSHOCKJR@GMAIL.COM, NOVAES@IEEE.COM, ALESSANDROBATSCHAUER@UDESC.BR

Abstract— This paper presents a voltage regulator based in a DSTATCOM applied to low voltage distribution grids. The DSTATCOM consists in a three-phase four-wire VSI connected to the grid through a second order low pass filter. The control structure is composed of three output voltage loops with active damping and the two DC bus loops. In addition, a new concept of mPPT is introduced, forcing the DSTATCOM to operate with the minimum power. In certain conditions, this means no compensation. The dynamic models of the converter are presented, as well as the control design. Simulation results show the capacity of regulation and the features of the mPPT, even under grid and load unbalance and non linear loads.

Keywords— Voltage regulation, DSTATCOM, Minimum power point tracker.

Resumo— Esse trabalho apresenta um regulador de tensão baseado em um DSTATCOM aplicado a redes de distribuição de baixa tensão. O DSTATCOM consiste em um inversor trifásico a quatro fios conectado a rede através de um filtro de segunda ordem. A estrutura de controle é composta por três malhas de tensão de saída com amortecimento ativo e duas malhas de tensão do barramento CC. Em adição, um novo conceito de mPPT é introduzido, forçando o DSTATCOM a operar com a mínima potência. Em certas ocasiões, isso significa nenhuma compensação. Os modelos dinâmicos do conversor são apresentados, assim como o projeto de controle. Resultados de simulação mostram a capacidade de regulação e as características do mPPT, mesmo com desequilíbrios na rede, na carga e com cargas não lineares.

Palavras-chave — Regulação de tensão, DSTATCOM, Rastreador do ponto de mínima potência.

1 Introdução

A ANEEL, através do módulo 8 do PRODIST, determina os valores das faixas de classificação da tensão de fornecimento em várias faixas de tensão. A Tabela 1 apresenta os limites para sistemas alimentados em 380 V (ANEEL, 2001).

Para ser considerado um problema de qualidade de energia, a tensão de fornecimento ao consumidor deve apresentar mais de 3% das leituras na faixa precária e apenas 0,5% na faixa crítica.

Quando for detectada uma classificação fora da faixa adequada, a concessionária de energia responsável pelo fornecimento a esse consumidor tem 90 dias para solucionar o problema, caso a transgressão esteja dentro da faixa precária, e somente 15 dias caso esteja dentro da faixa crítica.

Se não houver solução dentro do prazo estipulado, a concessionária de energia é penalizada. O valor da compensação deverá ser creditado na fatura de energia elétrica dos consumidores referente ao mês subsequente ao término dos prazos de regularização

dos níveis de tensão (ANEEL, 2001).

Soluções definitivas para problemas na rede muitas vezes demandam tempo para a análise da região onde há o problema de regulação de tensão, estudo de uma solução definitiva, aquisição e instalação do equipamento escolhido. Tal processo pode demorar mais do que o tempo determinado pelo PRODIST.

Assim, surge a necessidade de um dispositivo móvel e de uso temporário capaz de corrigir o problema de regulação de tensão imediatamente, até que uma solução definitiva seja executada.

Tal dispositivo, assim que uma solução de menor custo e mais robusta for implantada, poderá ser removido do ramal de distribuição ao qual está conectado e inserido em outro ramal com problemas de regulação de tensão.

Para a manutenção do nível de tensão, diversos equipamentos e dispositivos vêm sendo estudados e utilizados. Um deles é o compensador estático de reativos (DSTATCOM), que atua na circulação da energia reativa no sistema para manter o valor eficaz da tensão regulado.

A configuração escolhida para o circuito de potência para compor o DSTATCOM é o conversor meia ponte trifásico com filtro LC e barramento dividido. Essa configuração permite a operação independente para cada fase do sistema, devido à conexão do ponto central do barramento ao neutro.

Em DSTATCOMs controlados em tensão, a tensão do PCC (Ponto de Conexão Comum) é a tensão de saída do conversor e o DSTATCOM pode manter o PCC controlado independentemente de desequilíbrios na rede ou na carga. A rede elétrica fica respon-

Tabela 1. Faixa de Tensão para sistemas em 380/220 V.

Tensão de Atendimento	Faixa de Variação de Tensão de Leitura
Adequada	$201 \text{ V} \leq TL \leq 231 \text{ V}$ ($0,914 \leq TL \leq 1,05 \text{ pu}$)
Precária	$189 \text{ V} \leq TL \leq 201 \text{ V}$ ou $231 \text{ V} \leq TL \leq 233 \text{ V}$ ($0,859 \leq TL \leq 0,914$ ou $1,05 \leq TL \leq 1,059 \text{ pu}$)
Crítica	$TL < 189 \text{ V}$ ou $TL > 233 \text{ V}$ ($TL < 0,859$ ou $TL > 1,059 \text{ pu}$)

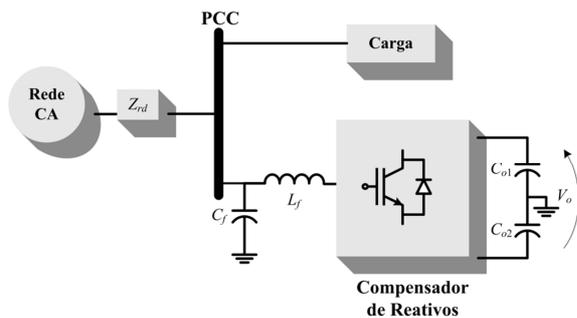


Figura 1. Rede de distribuição sob análise.

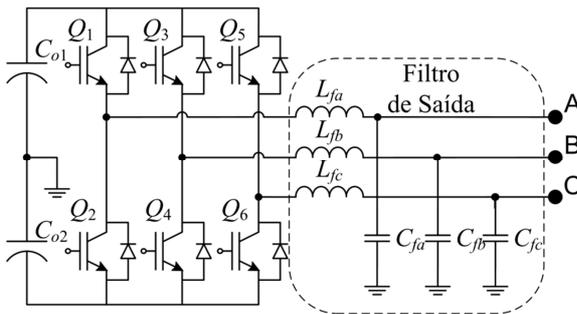


Figura 2. Circuito de potência implementado.

sável pela operação e manutenção do DSTATCOM (Ledwich e Ghosh, 2002). Assim, o problema de regulação pode ser encarado como um problema de controle (Enderle, et al., 2012). Com uma estrutura de controle adequada, o impacto de mudanças de carga pode ser rapidamente mitigado, evitando uma variação significativa no valor eficaz das tensões no PCC.

Esse artigo apresenta um DSTATCOM controlado em tensão operando em redes de distribuição de baixa tensão atuando como um regulador de tensão. O princípio de operação, sua estrutura de controle e resultados de simulação também são apresentados. Além disso, o conceito de rastreamento do ponto de mínima potência (mPPT) é explorado, garantindo a operação com menores valores de corrente, o que estende a vida útil do equipamento.

2 Análise do conversor

O modelo do alimentador com cargas conectadas ao PCC é apresentado na Figura 1. Nesse sistema, a amplitude e o ângulo da tensão do PCC são determinados pelas cargas, pela impedância equivalente do transformador e o fluxo de potência ativa e reativa proveniente do alimentador. A configuração adotada do DSTATCOM é apresentada na Figura 2.

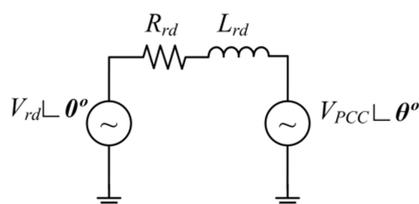


Figura 3. Representação simplificada do DSTATCOM conectado a rede.

Com a imposição da tensão ao PCC, é possível determinar o fluxo de potência que haverá entre o alimentador e o conversor para diversos valores de impedância do transformador e perfis de cargas lineares.

Para a análise do fluxo de potência, o conversor e as cargas são substituídas por uma fonte de tensão com um ângulo definido, como mostra a Figura 3. A impedância da rede é representada pela resistência dos cabos, R_{rd} , e pela indutância dos cabos e do alimentador, L_{rd} .

Isso pode ser feito porque o controle de tensão do conversor mantém a tensão do PCC regulada.

O fluxo de potência ativa e reativa fornecida pelo alimentador pode ser demonstrado, através das relações de potência complexa e análise de circuitos, que pode ser expresso por:

$$P_g = \frac{V_{rd}^2}{Z} \cdot \cos(\phi) - \frac{V_{rd} \cdot V_{PCC}}{Z} \cdot \cos(\phi) \cdot \cos(\theta) + \frac{V_{rd} \cdot V_{PCC}}{Z} \cdot \sin(\phi) \cdot \sin(\theta) \quad (1)$$

$$Q_g = \frac{V_{rd}^2}{Z} \cdot \sin(\phi) - \frac{V_{rd} \cdot V_{PCC}}{Z} \cdot \sin(\phi) \cdot \cos(\theta) - \frac{V_{rd} \cdot V_{PCC}}{Z} \cdot \cos(\phi) \cdot \sin(\theta) \quad (2)$$

onde θ é o ângulo da tensão no PCC, ϕ representa o ângulo da impedância da rede e Z seu módulo.

O balanço de energia ativa é dado, então, atribuindo um valor nulo para a potência ativa fornecida pelo DSTATCOM. Assim, pode-se escrever:

$$P_{rd} + P_o = 0 \quad (3)$$

onde P_o é a potência ativa consumida pela carga.

Substituindo (1) em (3), determina-se a equação que relaciona a potência de carga com o ângulo necessário para que o DSTATCOM não forneça energia ativa.

$$\frac{V_{rd}^2}{Z} \cdot \cos(\phi) - \frac{V_{rd} \cdot V_{PCC}}{Z} \cdot \cos(\phi) \cdot \cos(\theta) + \frac{V_{rd} \cdot V_{PCC}}{Z} \cdot \sin(\phi) \cdot \sin(\theta) + P_o = 0 \quad (4)$$

O balanço de energia reativa, diferentemente do balanço de energia ativa, é influenciado diretamente pelo DSTATCOM e é escrito por:

$$Q_{inv} = Q_o - Q_{rd} \quad (5)$$

onde Q_{inv} é a energia reativa fornecida ou absorvida pelo DSTATCOM e Q_o a energia reativa demandada pela carga.

Substituindo (2) em (5), determina-se a equação que quantiza a energia reativa que o DSTATCOM

deve fornecer para manter o ângulo θ encontrado anteriormente.

$$Q_{inv} = Q_o - \frac{V_{rd}^2}{Z} \cdot \sin(\phi) + \frac{V_{rd} \cdot V_{PCC}}{Z} \cdot \sin(\phi) \cdot \cos(\theta) + \frac{V_{rd} \cdot V_{PCC}}{Z} \cdot \cos(\phi) \cdot \sin(\theta) \quad (6)$$

A energia reativa fornecida pela rede elétrica também depende do ângulo θ , porém o ângulo θ é determinado pela energia ativa circulante, o qual já está definido para cada ponto de operação do DSTATCOM.

Com os valores de θ determinados, é possível determinar a energia reativa fornecida ou absorvida pelo DSTATCOM nesses pontos de operação.

A Figura 4 apresenta a solução numérica de (4) para uma carga indutiva com fator de potência igual 0,8 pu (com $Z = 0,2$ pu; $\phi = 45^\circ$; $V_{rd} = 1$ pu) tomando como variáveis a potência aparente da carga e a tensão do PCC.

Já a Figura 5 apresenta a solução numérica de (6), na qual é possível observar que há uma ampla faixa de operação na qual o conversor deverá processar potências acima de 1 pu. O plano em destaque na Figura 5 representa os valores nulos de potência processada.

3 Sistema de controle

Para a manutenção da operação do DSTATCOM junto ao sistema de distribuição de energia, o sistema de controle do inversor deve ser capaz de atender as seguintes especificações: as tensões de saída sintetizadas pelo conversor devem ser senoidais e com baixa distorção harmônica; regular a tensão total do barramento CC; e evitar desequilíbrios de tensão sobre os capacitores que compõem o barramento CC.

A estrutura de controle do DSTATCOM deve, então, possuir três malhas de controle distintas, constituídas de uma malha de tensão CA, uma malha de tensão total e uma malha de tensão diferencial do barramento CC. Por se tratar de um conversor trifásico, a malha de tensão CA é triplicada, uma para cada

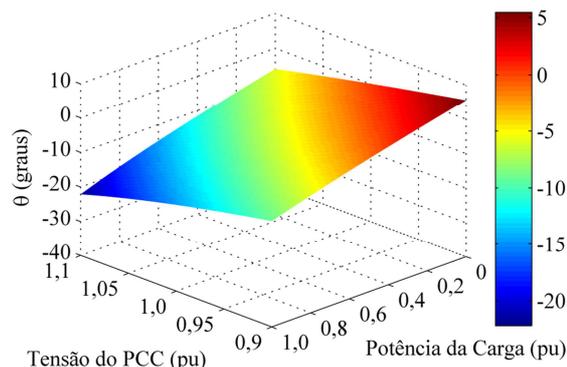


Figura 4. Ângulo de compensação em função da potência da carga e da tensão do PCC com $Z = 0,2$ pu, $\phi = 45^\circ$ e $V_{rd} = 1$ pu.

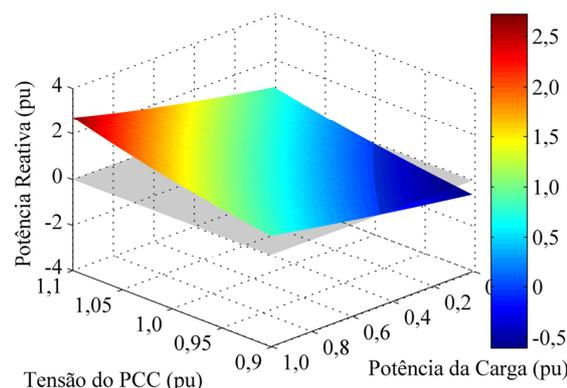


Figura 5. Potência reativa processada em função da potência da carga e da tensão do PCC com $Z = 0,2$ pu, $\phi = 45^\circ$ e $V_{rd} = 1$ pu.

fase do sistema.

Além disso, é proposta uma nova malha de controle responsável pela variação da amplitude da tensão do PCC. A Figura 6 apresenta o diagrama de blocos completo do sistema de controle.

A malha de amplitude, com base nas informações de tensão do PCC (v_{ac}) e corrente do conversor (i_{ac}), toma a decisão de aumentar ou diminuir a tensão do PCC (E).

A malha de tensão total regula a tensão total sobre os capacitores (v_o) através da variação da abertura angular entre a tensão da rede e a tensão do PCC (θ).

Para garantir o mesmo valor de tensão em cada

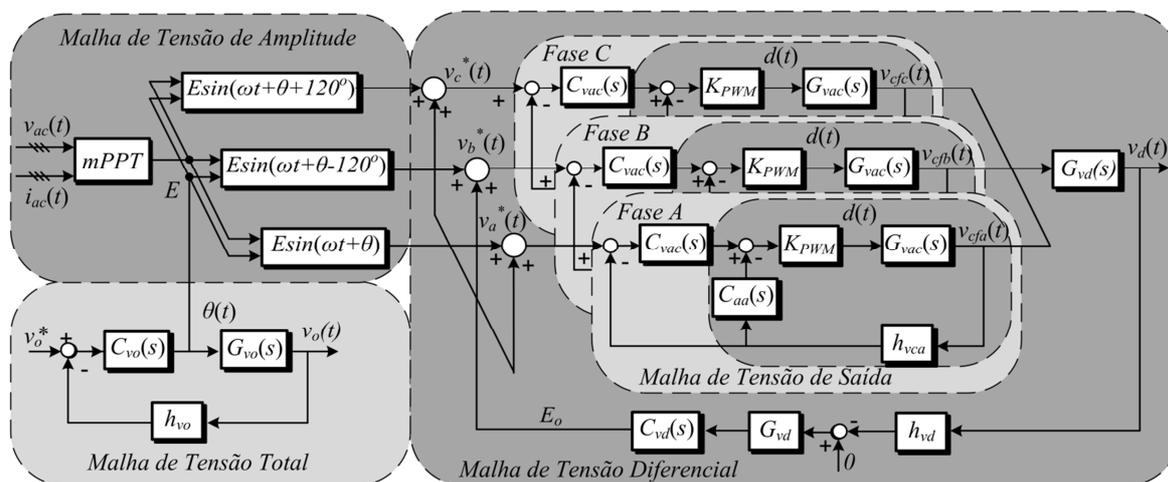


Figura 6. Diagrama de blocos completo do sistema de controle com o algoritmo de mPPT proposto.

capacitor, a malha de tensão diferencial atua no sistema inserindo um pequeno nível médio na tensão de referência (E_o), mantendo a diferença das tensões (v_d) próxima à zero.

Por fim, a malha de tensão de saída rastreia o sinal de referência gerado (v_a^* , v_b^* e v_c^*), impondo uma forma de onda senoidal e equilibrada no PCC (v_{cfa} , v_{cfb} e v_{cfc}). Nessa malha são incluídos controladores que promovem o amortecimento ativo do pico de ressonância do filtro (C_{fa}), reforçando a estabilidade do sistema.

2.1 Malha de tensão CA

O circuito do inversor trifásico com ponto médio pode ser representado por um circuito monofásico, conforme apresentado na Figura 7.

A função de transferência que relaciona a tensão no capacitor de saída C_{fa} e a razão cíclica d é obtida através da modelagem por valores médios instantâneos e é dada por:

$$\frac{v_{C_{fa}}(s)}{d(s)} = \frac{s \cdot V_o \cdot L_{ra} + V_o \cdot R_{ra}}{s^3 \cdot k_3 + s^2 \cdot k_2 + s \cdot k_1 + k_0} \quad (7)$$

onde:

$$k_3 = L_{fa} \cdot L_{ra} \cdot C_{fa} \quad (8)$$

$$k_2 = R_{ra} \cdot L_{fa} \cdot C_{fa} \quad (9)$$

$$k_1 = L_{fa} + L_{ra} \quad (10)$$

$$k_0 = R_{ra} \quad (11)$$

2.2 Malha de tensão total do barramento CC

Para o projeto do compensador da malha de tensão total é necessário determinar um modelo mate-

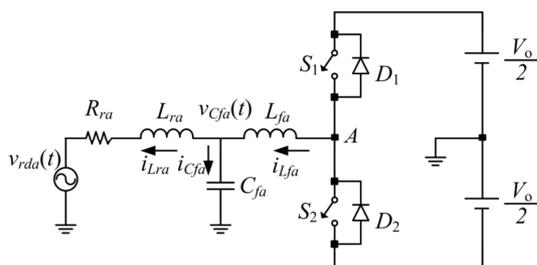


Figura 7. Circuito monofásico equivalente do conversor conectado a rede.

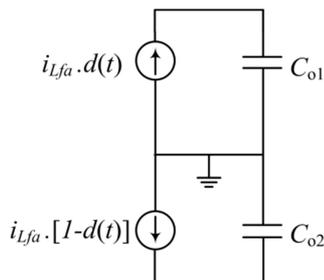


Figura 8. Circuito equivalente do conversor para o modelo de tensão diferencial.

mático que descreva o comportamento dinâmico da tensão total do barramento CC a partir do ângulo de defasagem entre a tensão da rede e a tensão no PCC.

O modelo matemático é obtido através do balanço de potência entre a rede e o conversor e a energia armazenada na capacitância do barramento CC. A regulação da tensão do barramento CC do DSTATCOM depende da pequena parcela de potência ativa drenada da rede pelo conversor. Essa energia pode ser determinada pela análise do fluxo de potência entre a tensão da rede e a tensão imposta ao PCC pelo conversor (Enderle, et al., 2012).

O modelo dinâmico que relaciona a tensão do barramento com a variação do ângulo de defasagem entre as tensões como segue.

$$\frac{v_o(s)}{\theta(s)} = -\frac{3 \cdot V_g \cdot V_{PCC}}{s \cdot \omega \cdot L_r \cdot C_{oeq} \cdot V_o} \quad (12)$$

2.3 Malha de tensão diferencial do barramento CC

O modelo dinâmico a ser utilizado na malha de controle diferencial deve relacionar a tensão diferencial entre as tensões dos capacitores do barramento CC e a tensão no PCC.

O circuito simplificado apresentado na Figura 8 pode ser utilizado para modelar a malha de tensão diferencial, pois a tensão no PCC é controlada pela malha de tensão de saída e o ângulo controlado pela malha de tensão total do barramento CC, implicando no consumo controlado de corrente.

A função de transferência que relaciona a tensão diferencial com a tensão no PCC é:

$$\frac{v_d(s)}{v_{PCC}(s)} = 3 \cdot \frac{s^2 \cdot L_r \cdot C_f + s \cdot R_r \cdot C_f + 1}{s^2 \cdot L_r \cdot C_o + s \cdot R_r \cdot C_o} \quad (13)$$

Um modelo simplificado pode ser obtido desprezando as dinâmicas mais rápidas do polo e dos zeros do modelo completo, resultando na expressão (14).

$$\frac{v_d(s)}{v_{PCC}(s)} = \frac{3}{s \cdot R_r \cdot C_o} \quad (14)$$

4 Malha de controle da amplitude da tensão de saída

A amplitude de tensão imposta ao PCC é usualmente definida como sendo a tensão nominal do sistema. Entretanto, a ANEEL permite que a tensão oscile dentro de uma faixa adequada de atendimento, como visto na Tabela 1.

Na Figura 5 verifica-se que a diminuição do valor eficaz da tensão do PCC implica na redução da energia reativa processada pelo conversor. Dessa forma, sempre haverá um ponto de operação, mesmo

que seja no limite mínimo e máximo permitido pela ANEEL, em que o conversor processa sua potência mínima.

O conversor, operando no ponto de mínima potência, apresentará menores valores eficazes de corrente e, por consequência, menos perdas nos componentes. A redução do valor eficaz de corrente produz também um aumento na vida útil do conversor.

Com a adição de uma malha externa, Figura 6, responsável pela determinação das amplitudes de tensão nas três fases do PCC, é possível minimizar os esforços de potência do conversor, além de garantir que essa amplitude não deixe a faixa de atendimento adequada.

Como a potência ativa será uma pequena parcela em comparação com a potência reativa, escolhe-se a potência aparente processada pelo conversor para ser minimizada, já que seus valores numéricos serão quase iguais.

Para tanto, é necessário medir as grandezas elétricas para que seja possível calcular a potência aparente processada pelo DSTATCOM e, com bases nessas informações, atuar sobre o sistema.

A estratégia de minimização da potência aparente escolhida baseia-se no método P&O (Esram e Chapman, 2007) (Ansari, et al., 2009) (Azevedo, et al., 2008), porém busca o Ponto de Mínima Potência (mPP) processada pelo conversor.

A Figura 9 traz um exemplo de minimização. Quando o conversor está operando à esquerda do mPP e a tensão é incrementada (ponto 1), há a diminuição da potência aparente processada pelo conversor. Como esse sentido leva o conversor ao mPP, a amplitude deve ser incrementada no mesmo sentido atual. Entretanto, se a tensão é decrementada (ponto 2), a potência aumenta e o sistema está divergindo do mPP. Nessa situação, o sentido de incremento deve ser o oposto do sentido atual.

Analogamente, quando o conversor operar à direita do mPP, um acréscimo de tensão leva o sistema à divergência (ponto 3) e seu sentido deve ser invertido, assim como um decréscimo traz o sistema ao

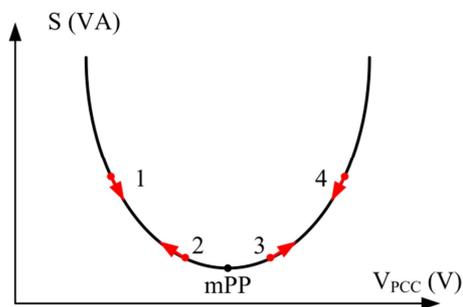


Figura 9. Sistemática do mPP.

Tabela 2. Resumo da ação do algoritmo do mPP.

Sentido da Potência Aparente	Sentido da Amplitude da Tensão	Ponto de operação	Ação a ser tomada
aumentando	aumentando	3	decrementar
	diminuindo	2	incrementar
diminuindo	aumentando	1	incrementar
	diminuindo	4	decrementar

mPP (ponto 4) e seu sentido deve ser mantido.

Com base nessas características, a Tabela 2 resume a ação de controle a ser tomada frente aos quatro possíveis pontos de operação.

5 Projeto do sistema de controle

A metodologia de projeto utilizada é baseada na metodologia de resposta em frequência no plano w (Ogata, 1994).

O projeto dos compensadores que compõem o sistema de controle mostrado na Figura 6 foi baseado nos parâmetros mostrados na Tabela 3.

4.1 Malha de tensão de saída

A malha de tensão de saída é composta por dois controladores, um controlador de amortecimento ativo e um controlador de tensão.

A técnica de amortecimento ativo empregada é apresentada em (Nishioka, 2011) e é realizada através da utilização de um compensador em avanço aplicado à leitura de tensão do PCC. O sinal resultante é aplicado no sinal de saída do compensador de tensão de saída. O compensador em avanço projetado é:

$$C_{aa}(z) = \frac{1,671 \cdot z^2 - 3,059 \cdot z + 1,4}{z^2 - 0,476 \cdot z + 0,05663} \quad (15)$$

Para o projeto do compensador de tensão de saída, a malha interna de amortecimento é substituída por sua dinâmica em malha fechada.

O compensador escolhido para compor a malha de tensão do DSTATCOM é um compensador do tipo proporcional integral derivativo.

O compensador obtido é dado pela equação (16). A frequência de cruzamento obtida com esse compensador foi de 4,93 kHz com uma margem de fase de 63,6°.

$$C_{vac}(z) = \frac{7,106 \cdot z^2 - 10,2 \cdot z + 3,658}{z^2 - 0,1476 \cdot z - 0,8524} \quad (16)$$

Tabela 3. Parâmetros do DSTATCOM.

Potência nominal	S_o	30 kVA
Tensão nominal do barramento CC	V_o	800 V
Tensão da rede	V_{rd}	220 V
Frequência da rede	f_{rd}	60 Hz
Frequência de comutação	f_s	20 kHz
Frequência de amostragem	f_{a1}	20 kHz
Frequência de amostragem	f_{a2}	2 kHz
Capacitância do barramento CC	C_{oeq}	3500 μ F
Indutância de filtro	L_f	560 μ H
Capacitância de filtro	C_f	47 μ F
Resistência da rede	R_r	0.685 Ω
Indutância da rede	L_r	1.82 mH

A Figura 10 apresenta o diagrama de Bode contendo a resposta em frequência de malha aberta da tensão de saída não compensada, do controlador de tensão e a da tensão de saída compensada.

4.2 Malha de tensão total do barramento CC

O compensador escolhido para compor a malha de tensão total do barramento CC é um compensador do tipo proporcional integral com a adição de um polo em alta frequência.

O compensador obtido é dado pela equação (17).

$$C_{vo}(z) = \frac{0,0001607 \cdot z^2 + 1,837 \cdot 10^{-6} \cdot z - 0,0001588}{z^2 - 1,278 \cdot z + 0,278} \quad (17)$$

A frequência de cruzamento obtida com esse compensador foi de 39,4 Hz com uma margem de fase de 78,4°.

A Figura 11 apresenta o diagrama de Bode contendo a resposta em frequência da malha aberta de tensão total não compensada, do controlador de tensão total e da malha tensão total compensada.

4.3 Malha de tensão diferencial do barramento CC

O compensador escolhido para compor a malha de tensão diferencial do barramento CC é um compensador do tipo proporcional integral com a adição de um polo em alta frequência.

O compensador obtido é dado pela equação.

$$C_{vd}(z) = \frac{0,002475 \cdot z^2 + 1,237 \cdot 10^{-6} \cdot z - 0,002474}{z^2 - 1,9797 \cdot z + 0,9797} \quad (18)$$

A Figura 12 apresenta o diagrama de Bode contendo a resposta em frequência da malha aberta de tensão diferencial não compensada, do controlador de tensão diferencial e da malha tensão diferencial compensada.

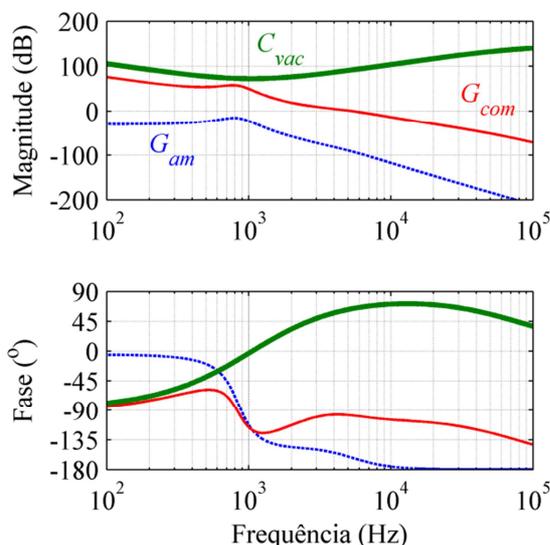


Figura 10. Resposta em frequência da malha de tensão de saída.

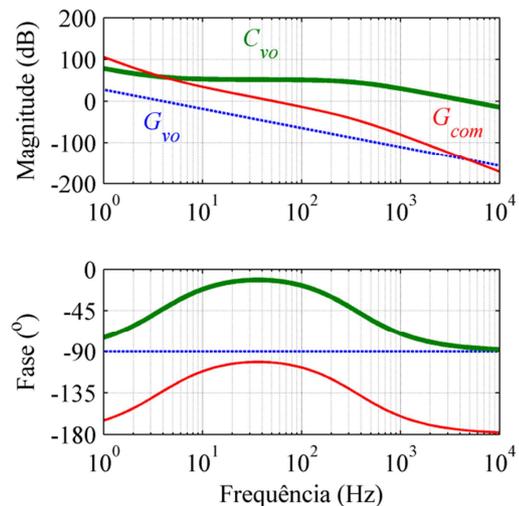


Figura 11. Resposta em frequência da malha de tensão total.

A frequência de cruzamento obtida com esse compensador foi de 0,83 Hz com uma margem de fase de 76,5°.

6 Resultados de Simulação

O DSTATCOM foi simulado no software PSIM® com as especificações contidas na Tabela 3, barramento CC inicialmente carregado com a tensão nominal e com carga indutiva com fator de potência de 0,8 e com 0,8 pu (24 kVA) de potência.

As formas de onda de tensão no PCC são mostradas na Figura 13 com correção e sem correção (linhas pretas).

Sem correção a tensão no PCC possui 0,862 pu (189,6 V), abaixo do limite da ANEEL. O conversor processa então 26,1 kVA (0,867 pu) para manter o valor de tensão no valor escolhido (0,97 pu). Caso o valor escolhido passe a ser de 1 pu, o conversor terá de processar 35,8 kVA (1,193 pu).

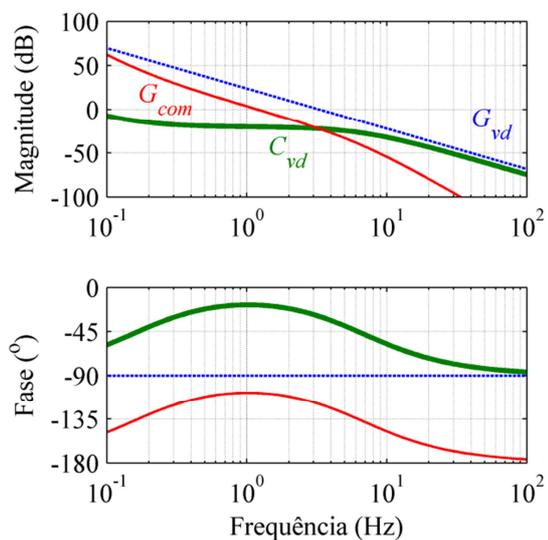


Figura 12. Resposta em frequência da malha de tensão diferencial.

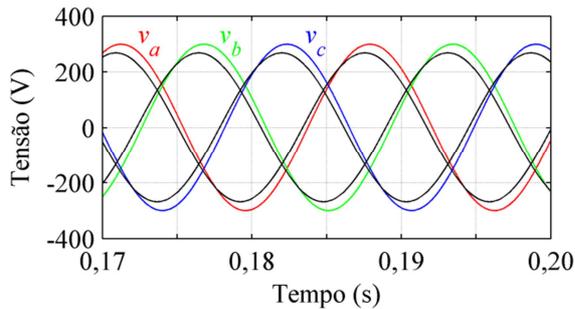


Figura 13. Tensão na rede e no PCC.

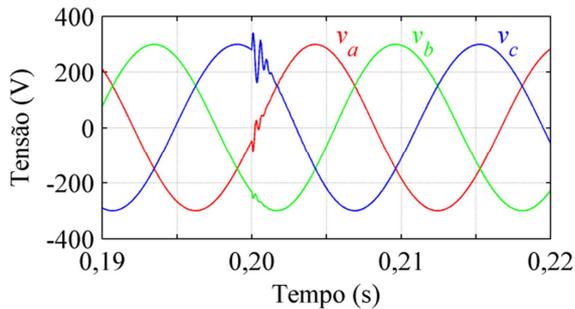


Figura 14. Transitório na tensão do PCC.

Durante um transitório de carga de 24 kVA para 15 kVA (0,5 pu), a Figura 14 apresenta as formas de onda de tensão do PCC. Nota-se que rapidamente o controle rejeita a perturbação e não há mudança significativa em seu valor eficaz.

A atuação da malha de amplitude sobre o conversor pode ser vista na Figura 15.

O valor inicial para o mPPT é de 0,97 pu e decresce até o mínimo arbitrado (0,94 pu), provocando diminuição da potência aparente total processada de 26,1 kVA para 17,4 kVA, conforme a Figura 16. Isso significa uma redução de 35%. A carga foi mantida em 0,8 pu e os degraus de tensão são de 0,44 V (0,002 pu).

Quando a rede de distribuição opera com baixa carga (assumido como sendo 0,25 pu), o equilíbrio é

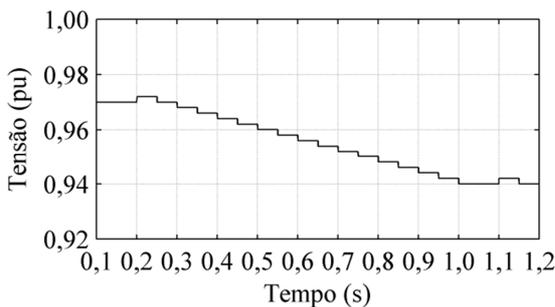


Figura 15. Tensão no PCC com o mPPT.

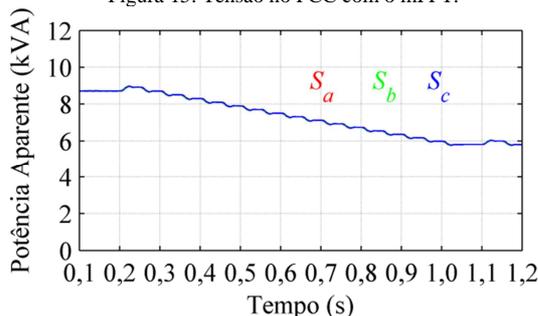


Figura 16. Potência processada com o mPPT.

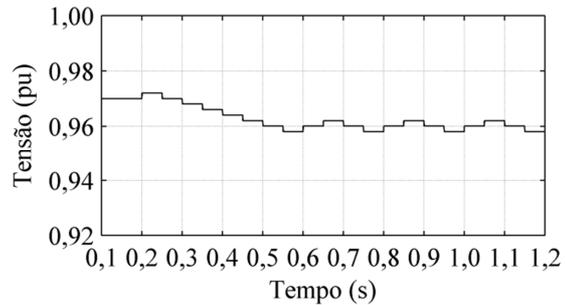


Figura 17. Tensão no PCC com o mPPT.

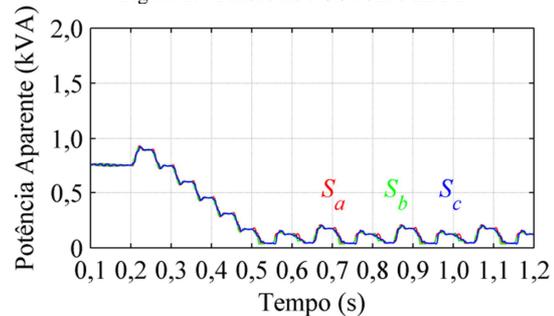


Figura 18. Potência processada com o mPPT.

atingido com a tensão do PCC em torno de 211,2 V (0,96 pu), como visto na Figura 17.

A potência aparente converge para zero conforme a Figura 18. O conversor, tendo como tensão de regulação 1 pu, processaria 9,1 kVA (0,303 pu), contra menos de 600 VA utilizando a malha de mPPT, uma redução de 93,4 %.

O conversor também foi simulado considerando cargas desequilibradas, muito frequentes em redes de distribuição em baixa tensão. A carga é indutiva com fator de potência de 0,8, sendo que na fase A é conectada uma carga de 0,8 pu, na fase B de 0,6 pu e na fase C de 0,7 pu. O valor de tensão do PCC de 0,97 foi mantido.

A Figura 19 mostra as formas de onda da tensão no PCC e na rede (linhas pretas), onde se nota que a tensão compensada possui o mesmo valor eficaz, o

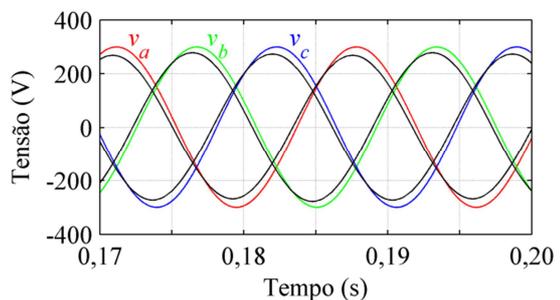


Figura 19. Tensão na rede e no PCC com cargas desequilibradas.

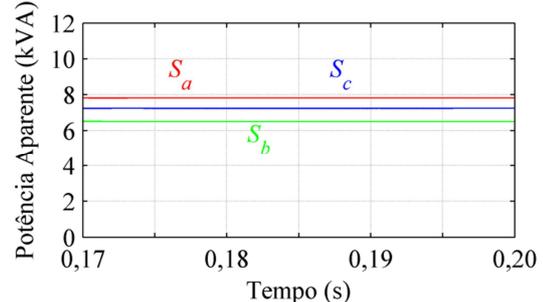


Figura 20. Potência processada por fase do conversor com cargas desequilibradas.

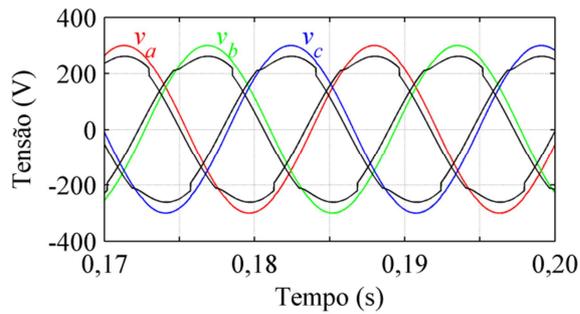


Figura 21. Tensões na rede e no PCC com carga não linear.

que não ocorre na rede sem compensação (0,862 pu, 0,893 pu e 0,877 pu, respectivamente).

Para tanto, o conversor passa a processar diferentes valores de potência, como mostra a Figura 20.

Adicionando 2 kVA de carga não linear (retificador monofásico com filtro capacitivo) em cada fase, a Figura 21 apresenta as formas de onda de tensão do PCC. Através do software de simulação, as tensões do PCC contém THD abaixo de 0,5 % na frequência fundamental.

O formato da corrente da carga é mostrado na Figura 22, cujo conteúdo harmônico é de 15,3%.

O conversor, impondo uma forma de onda de tensão em paralelo com a carga, se comporta como uma fonte de tensão na frequência fundamental. Sendo assim, sua impedância para outras frequências diferentes será muito baixa e o conteúdo harmônico será processado pelo DSTATCOM.

Esse fato pode ser observado na corrente de compensação do conversor, Figura 23, que possui o formato complementar à distorção provocada pela parcela não linear da carga.

7 Conclusão

Esse artigo apresentou um DSTATCOM trifásico atuando na regulação de tensão de uma linha de distribuição de energia e sua estrutura de controle.

Os resultados de simulação demonstram a capacidade de regulação de tensão, mantendo tensões equilibradas sob perturbações de carga, inclusive não lineares.

A malha de amplitude proposta foi capaz de reduzir a potência processada pelo conversor em 35 % com carga pesada e em 93 % com carga leve. Nesse sentido, o algoritmo do mPPT proposto rastreou adequadamente o ponto de mínima potência processada pelo conversor, respeitando os valores mínimos de tensão, e atingiu potência aparente próxima a zero quando a compensação de tensão não é necessária.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC) e a Centrais Elétricas de Santa Catarina S.A. (CELESC) pelo apoio ao projeto.

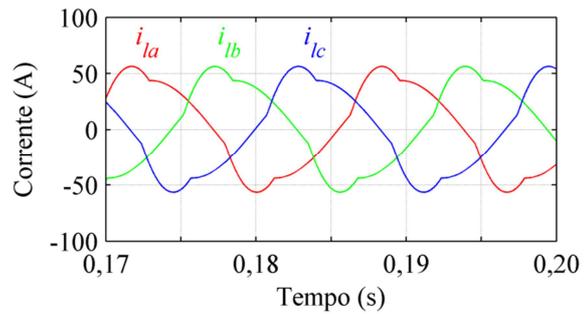


Figura 22. Corrente da carga com parcela não linear.

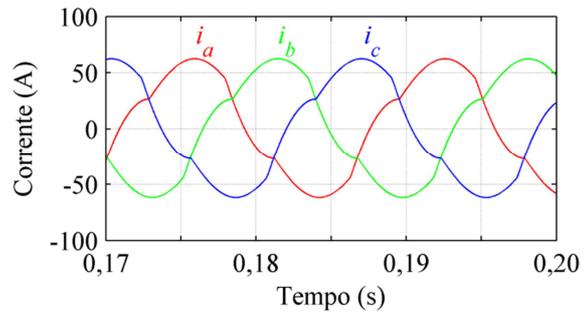


Figura 23. Corrente do conversor com carga não linear.

Referências Bibliográficas

- ANEEL, (2001). Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica.
- Ansari, F, Iqbal, A, Chatterji, S and Afzal, A (2009). Control of MPPT for photovoltaic systems using advanced algorithm EPP, *International Conference on Power Systems*.
- Azevedo, G. M. S., Cavalcanti, M.C., Oliveira, K.C., Neves, F. A. S. & Lins, Z. D. (2008). Evaluation of maximum power point tracking methods for grid connected photovoltaic systems, *IEEE Power Electronics Specialists Conference*.
- Enderle, T. P., da Silva, G. S., Fischer, C., Beltrame, R. C., Schuch, L., Montagner, V. F. and Rech, C. (2012). D-STATCOM applied to single-phase distribution networks: Modeling and control, *IECON 2012 - 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*.
- Esrarn, T., Chapman, P. L. (2007). Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol 22, no. 2, pp. 439-449.
- Ledwich, G., Ghosh, A. (2002). A flexible DSTATCOM operating in voltage or current control mode, *IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution*, vol 149, no. 2, pp. 215-224.
- Nishioka, J. K. (2011), Sistema de Controle Digital para Retificador Trifásico a Quatro Fios com Filtro LCL, Dissertação de Mestrado, Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville.
- Ogata, K (1994), Discrete-Time Control Systems, 2nd edn, Prentice Hall, New Jersey.