

Controle de um DSTATCOM multifuncional controlado em corrente e com mitigação de harmônicas através de detecção de tensão

Jean Carlo da Cunha
UDESC, Dept. Eng. Elet.
Joinville, Brasil

Sérgio V. G. Oliveira
UDESC, Dept. Eng. Elet.
Joinville, Brasil

Leandro Michels
UFSM, Dept. Eng. Elet.
Santa Maria, Brasil

Marcello Mezaroba
UDESC, Dept. Eng. Elet.
Joinville, Brasil

Email: cunha.jeanc@gmail.com Email: sergio_vidal@ieee.org Email: michels@ieee.org Email: marcello.mezaroba@udesc.br

Resumo—Este trabalho apresenta um esquema de controle de um Compensador Estático para rede de Distribuição (DSTATCOM), utilizado para regular a magnitude da tensão no ponto de conexão de carga (PCC) e também possui a função de eliminar harmônicas de tensão através da detecção da tensão no PCC. A regulação da magnitude da tensão é efetuada através da injeção de corrente em quadratura no PCC e a mitigação de harmônicas é efetuada através da leitura da tensão do PCC e geração de correntes harmônicas capazes de compensar as distorções na tensão do PCC, onde não há necessidade da leitura de corrente da rede ou da carga. O regulador é implementado através de um conversor VSI trifásico à quatro fios conectado em paralelo com a rede de distribuição. A potência ativa drenada pelo conversor é somente para suprir suas perdas e controlar a tensão do barramento CC. Este trabalho possui resultados de simulação para o sistema completo e resultados experimentais preliminares.

Palavras Chaves - DSTATCOM, STATCOM, FAP, Regulação de Tensão, Conversor multifuncional ,Detecção de tensão;

I. INTRODUÇÃO

No Brasil a qualidade da tensão fornecida aos consumidores é regulamentado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) através dos Procedimentos de Distribuição (PRODIST) [1], dessa forma é necessário que o nível de tensão da rede seja adequado e seu conteúdo harmônico limitado, como previsto na normativa internacional IEEE 519 [2]. Atualmente, a ANEEL obriga o ressarcimento, por parte da concessionária, aos consumidores que não possuam uma amplitude de tensão adequada ,especificada por [1], no ponto de conexão de carga (PCC). Apesar de ainda não implementada, é natural que uma política semelhante seja aplicada futuramente em relação ao conteúdo harmônico da tensão do PCC (v_{PCC}).

Soluções como melhoria de infraestrutura, inserção de elementos passivos na rede e adequação de TAPs de transformadores são naturais, porém, requerem um planejamento por parte da concessionária, que poderá demorar mais que o prazo permitido pela ANEEL para a adequação da qualidade da tensão. Para a implementação de uma solução definitiva sem penalizações da distribuidora e solucionar rapidamente o problema dos consumidores, este trabalho propõe uma solução temporária, de rápida implementação, fácil instalação e baixo volume chamada de Dispositivo Móvel Regulador

da Qualidade de Tensão (DMRQT). Onde após a solução permanente ser implantada, o DMRQT poderá ser movido para outro ponto problemático.

As soluções ativas empregadas nas redes de transmissão e distribuição são capazes de aumentar a capacidade de transmissão de potência do sistema, melhorar a qualidade da tensão e a estabilidade do sistema [3], [4]. Devido a sua flexibilidade, elas podem adquirir multifuncionalidades [4]–[8] como em aplicações em geração distribuída (GD).

Para viabilizar a implementação do DMRQT este trabalho sugere uma solução com processamento apenas de energia reativa, com peso e volume reduzidos e dispensando fontes externas de energia. É necessário conexão em paralelo com o sistema de distribuição pois a abertura de uma linha torna a instalação do dispositivo mais complexa, demorada e menos confiável. Tais características são encontradas em compensadores estáticos síncronos (STATCOM) [9], STATCOMs aplicados à distribuição (DSTATCOM) [10]–[12], Filtros Ativos Paralelos (FAP) com compensação de reativos [13]–[34] e conversores multifuncionais [4], [5], [7], [8], [35]–[46] que incluem sistemas de GD. Muitas vezes a diferença entre estes conversores é somente a sua principal função [13], pois com apenas sutis modificações no controle muitos podem atuar em outras funções. O DMRQT prioriza a regulação da magnitude da tensão v_{PCC} em uma rede de distribuição, sendo classificado como DSTATCOM com multifuncionalidade de mitigação de harmônicas de tensão.

O DMRQT é implementado através de um conversor trifásico a quatro fios para regulação da qualidade de v_{PCC} em uma rede de distribuição do cenário brasileiro, estendendo o prazo da distribuidora na implementação da melhor solução definitiva para o problema de qualidade de energia. O conversor pode ser conectado em qualquer ponto da rede de distribuição, não sendo necessariamente no mesmo ponto de uma carga problemática, e deve adequar a tensão v_{PCC} em tempo inferior à 3 segundos, de acordo com [1]. A estrutura geral do sistema é apresentada na Fig. 1.

Na Seção II é abordada a técnica de controle utilizada e o projeto de controle onde na Seção II-D é comentado sobre a iteração entre todas as malhas de controle. Na sequência a

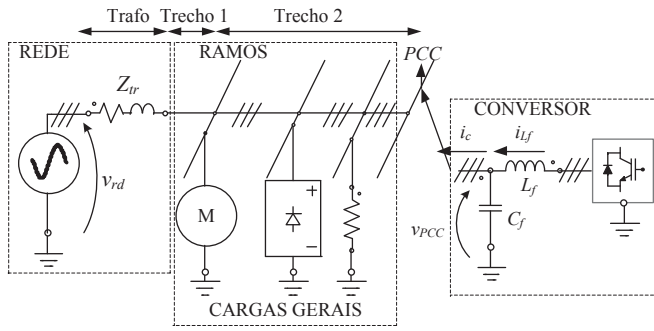


Fig. 1. Estrutura geral do sistema, exemplificando um ponto onde o DMRQT poderá ser conectado.

Seção III apresenta a validação da técnica de controle através de resultados de simulação e por fim a Seção V apresenta as principais conclusões do trabalho.

II. ESTRATÉGIA DE CONTROLE

A estratégia de controle de um DSTATCOM pode ser basicamente classificada como controle em corrente ou tensão. No controle por tensão [35], [40], [45] há natural regulação da amplitude e de harmônicas de v_{PCC} , porém a limitação da corrente i_{L_f} do conversor não é natural, reduzindo a robustez da aplicação a transitórios. Há técnicas de controle para proteção indireta contra sobrecorrentes no conversor [35], [40], [47], porém se baseiam no conhecimento prévio da impedância da rede ou até mesmo necessitam da inserção de uma impedância em série com o conversor para promover sua proteção [4]. Este trabalho prioriza a robustez da aplicação, portanto utiliza um controle em corrente, onde mesmo sob variações bruscas de v_{PCC} a corrente do indutor L_f (i_{L_f}) é limitada simplesmente limitando as referências de corrente.

A estratégia de mitigação de harmônicas pode ser classificada em: detecção de corrente da carga, de corrente da fonte ou de tensão [25]. Este trabalho utiliza a detecção de tensão visto que o DMRQT pode ser implementado próximo à carga com conteúdo harmônico, porém a carga não será facilmente detectável pela distribuidora (ver Fig. 1), inviabilizando mitigação de harmônicas através de detecção de corrente.

A mitigação de harmônicas através da detecção de v_{PCC} pode ser efetuada através de emulação de resistores para harmônicas, promovendo o amortecimento ativo delas [14], [22], [25], [26], [28], [29], [36], [37], [48]. Porém a eliminação total de harmônicas não é vislumbrada. Em [31] é emulado filtros passivos sintonizados, porém os filtros poderão entrar em ressonância com cargas não previstas [34]. Com características similares ao controle de tensão direto, porém controladas em corrente, há soluções que utilizam técnicas não lineares e adaptativas [7], [43], [44], [49]–[51] porém algumas estão sujeitas ao fenômeno de *chattering* e agregam maior complexidade comparadas à técnicas lineares. Este trabalho não visa a compensação de distorções aperiódicas em v_{PCC} e tais técnicas não se tornam atrativas.

Harmônicas também são mitigados utilizando controladores baseados no modelo interno, como ressonantes [13], [18], [42]

e repetitivos [21], e também são aplicados no controle de corrente, pois permitem bom seguimento de referência e boa rejeição de distúrbios periódicos. Este trabalho usa controladores ressonantes na compensação de harmônicas onde é possível atuar somente nas frequências desejadas.

A estratégia de controle utilizada é apresentada na Fig. 2, sendo semelhante à apresentada em [52], se diferencia principalmente pela adição da malha de harmônicas e consideração das variações paramétricas da rede no projeto dos controladores. Na amostragem da tensão v_{PCC} foram utilizados filtros anti-alias f_{aa} . Para a geração das referências providas do circuito *Phase-Locked-Loop* (PLL), do valor eficaz de v_{PCC} e de i_h^* há conversores de sinal digital para analógico (CDA) convencionais e utilizando PWM com filtros de alta frequência f_{DA} . O controle é feito nas coordenadas abc facilitando a atuação do conversor no equilíbrio das fases, pois basta replicar os mesmos controladores para as três malhas. A malha de corrente possui alta banda passante (10 kHz), utiliza um controlador proporcional integral (PI) e é replicada nas três fases. A referência de corrente i_{ref}^* é composta por quatro componentes:

- i_{cc}^* - Componente contínua utilizada na compensação de desbalanços na tensão do barramento CC ($V_{b+} - V_{b-}$).
- i_0^* - Componente direta sincronizada com v_{PCC} , onde o conversor absorverá uma pequena parcela de potência ativa necessária para regulação da tensão do barramento CC V_{total} .
- i_{90}^* - Componente em quadratura com v_{PCC} , necessária para circulação de reativos entre o conversor e a rede, promovendo a regulação da magnitude de v_{PCC} .
- i_h^* - Componentes harmônicas de v_{PCC} necessárias para complementar as correntes de cargas não lineares e reduzir o conteúdo harmônico refletido em v_{PCC} .

O controle de harmônicas é efetuado utilizando uma soma de quatro filtros ressonantes [13] centrados na 3^a, 5^a, 7^a e 9^a harmônicas, onde se concentra grande parte da energia provida de harmônicas. O controlador (C_{V_h}) recebe o sinal de v_{PCC} e gera uma referência de corrente harmônica (i_h^*) que mitiga harmônicas de tensão. Exclusivamente este controlador é implementado digitalmente.

V_{total} é controlada utilizando um controlador PI (C_{total}) com banda passante em torno de 6 Hz, não interagindo na oscilação natural de V_{total} . O sinal do controlador C_{total} é multiplicado por uma componente sincronizada com v_{PCC} através do PLL, gerando i_0^* .

A tensão diferencial ($V_{dif} = V_{b+} - V_{b-}$) do barramento CC é controlada utilizando um controlador PI (C_{dif}) com banda passante em torno de 2 Hz, filtrando sinais de frequência superior ou iguais a da rede. O sinal do controlador C_{dif} produz a referência de corrente contínua i_{cc}^* .

O valor eficaz de tensão do PCC ($v_{PCC,rms}$) é controlado utilizando um controlador PI (C_{rms}) com banda passante em torno de 1 Hz, não atuando na frequência natural da rede. O sinal do controlador C_{rms} é multiplicado por uma componente em quadratura com v_{PCC} provida do PLL, gerando i_{90}^* .

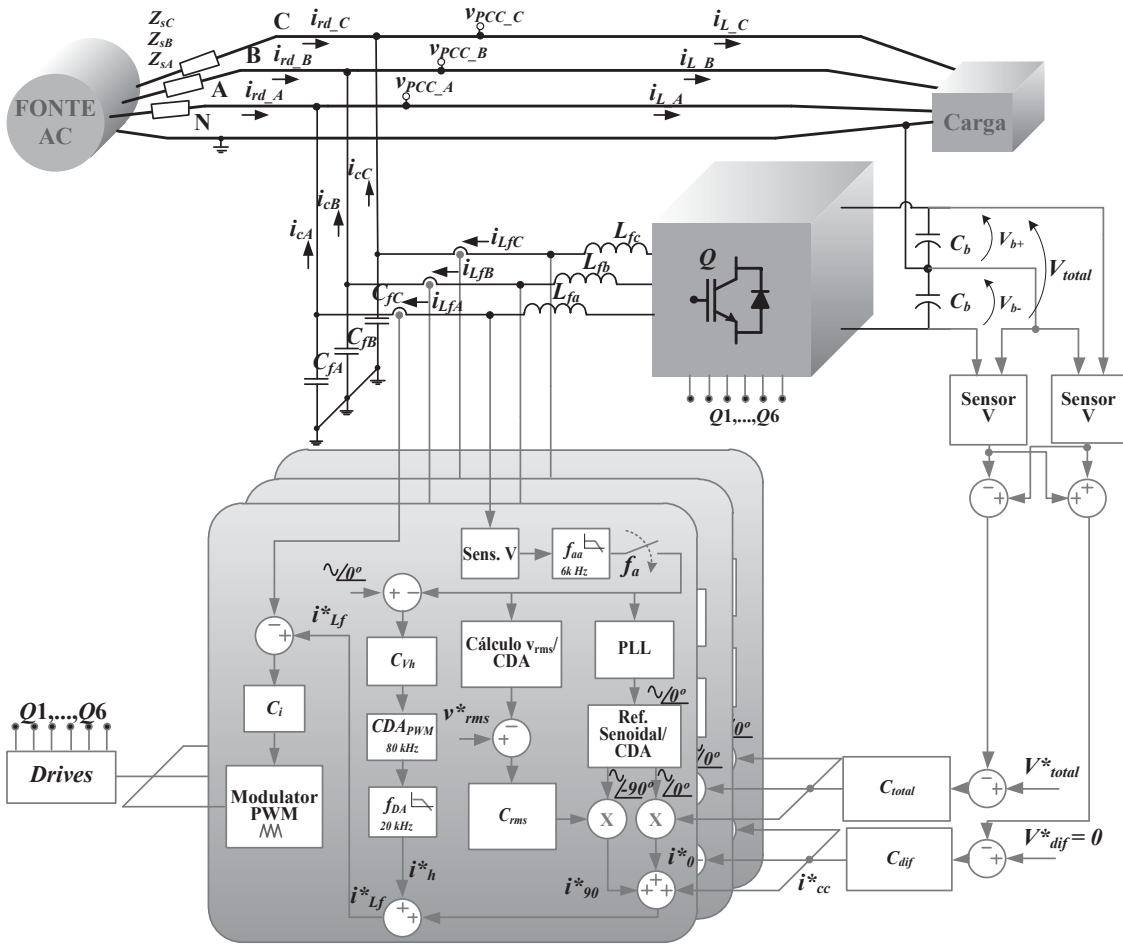


Fig. 2. Diagrama geral das malhas de controle.

TABELA I
CONTROLADORES C_{total} , C_{dif} E C_{rms}

Controlador	Função de Transferência
C_{total} (s)	$6 \frac{s/2\pi 6 + 1}{s^2/2\pi 60 + s}$
C_{dif} (s)	$3.3 \frac{s/2\pi 2 + 1}{s^2/2\pi 20 + s}$
C_{rms} (s)	$3100 \frac{s/2\pi 2 + 1}{s^2/2\pi 13 + s}$

Como o projeto dos controladores C_{total} , C_{dif} e C_{rms} são muito semelhantes aos já implementadas em [52], eles não serão abordados. Esse controladores são apresentados na Tabela I.

A. Condições de contorno

Os parâmetros do DMRQT são mostrados na Tabela II.

Este trabalho foi baseado em um ramo de uma rede de distribuição já implantada. O ramo possui dois trechos em seu caminho de 277 metros do transformador até o PCC no final do ramo mais distante, eles são ilustrados na Fig. 1. Os dados da rede são mostrados na tabela III, onde ao final

da linha há uma relação R/X_L de 2,3 e esse valor tende a aumentar com o aumento de comprimento da linha ou redução de potência do transformador. Para fins de projeto este trabalho considera como variação paramétrica mínima e máxima da impedância série respectivamente $Z_{s,p} = (50m + 50\mu 2\pi f_{rd})\Omega$ e $Z_{s,g} = (500m + 500\mu 2\pi f_{rd})\Omega$, onde a potência necessária para compensação da tensão v_{PCC} pode ser analisa através da metodologia apresentada em [53].

Caso o conversor ultrapasse os limites de corrente que é capaz de injetar na rede a corrente de saída i_c ficará sob efeitos de não linearidades devido à saturação da ação de controle, assim o conversor pode colaborar para a distorção harmônica de v_{PCC} . Considerando a máxima tensão de pico que o conversor é capaz de gerar $V_{total}/2$ e a máxima tensão de rede como $V_{rd.pk}$ a máxima corrente que o conversor é capaz de impor na rede é aproximada por (1), onde o modulador PWM é modelado como um ganho e $G_i(s)$ é a planta de corrente descrita em (2). Os limites de corrente para cada harmônico, já considerando a limitação de corrente das chaves do conversor são apresentados na Fig. 3.

$$I_{max}(s) = \left(\frac{V_{total}}{2} - V_{rd.pk} \right) \frac{2V_t}{V_{total}} G_i(s) \quad (1)$$

TABELA II
ESPECIFICAÇÕES DO DMRQT

Parâmetro	Valor
Potência nominal do conversor	$S_{conv} = 30$ kVA
Tensão de pico da rede	$V_{rd.pk} = 311$ V
Tensão total do barramento CC	$V_{total} = 800$ V
Capacitância total do barramento CC	$C_B = C_b/2 = 4700$ μ F
Indutância do filtro do conversor	$L_f = 560$ μ H
Capacitância do filtro do conversor	$C_f = 47$ μ H
Ganho dos sensores de corrente	$K_i = 0,068$
Ganho dos sensores de tensão	$K_v = 0,01$
Ganho dos Multiplicadores	$M_x = 1$
Tensão de pico da portadora	$V_i = 11$ V
Frequência da rede	$f_{rd} = 60$ Hz
Frequência de comutação	$f_s = 19080$ Hz
Frequência de amostragem	$f_a = 19080$ Hz

TABELA III
ESPECIFICAÇÕES DA REDE DE DISTRIBUIÇÃO

Parâmetro /Elemento	Impedância (Ω /Km)	Comp. (m)	R (máx) (m Ω)	L (máx) (μ H)
Trecho 1	$0,599 + j0,467$	34	21	42,7
Trecho 2	$1,485 + j0,508$	243	361	327,5
Trafo	-	-	6,5	85,8
Parâm.(máx)	-	277	391	456
Parâm.(mín)	-	0	6,5	85,8

B. Controle de corrente

Uma vez que o conversor possui barramento CC com ponto central conectado ao neutro, o circuito equivalente da planta de corrente é monofásico, mostrado na Fig. 4, onde i_L , $v_{c.PWM}$, r_s e L_s representam respectivamente a corrente de uma carga, a tensão com modulação PWM na saída de um braço do conversor, a resistência série equivalente do caminho da rede e a indutância série equivalente do caminho da rede.

O modelo da planta de corrente considera o modulador PWM (portadora triangular) como apenas um ganho, possuindo boa fidelidade até aproximadamente 15 kHz, o que juntamente com o controle analógico facilita o controle da planta pois não há grande atraso de fase antes dessa frequência, permitindo um aumento da banda passante da malha. Situação que fica mais complexa ao utilizar um segurador de ordem zero com controle digital para a malha de corrente.

A planta de corrente é mostrada em (2), onde $G_i(s)$ representa i_{Lf} pela razão cíclica d . Para o projeto dos controladores foi incluso uma resistência de carga de 1K Ω e resistência série do indutor L_f de 0,1 Ω nesse modelo. O controlador de corrente C_i utilizado é apresentado em (3).

$$G_i(s) = \frac{(V_{total}/2V_i) [s^2 (L_s C_f) + s (r_s C_f) + 1]}{s^3 (L_s L_f C_f) + s^2 (L_f r_s C_f) + s (L_f + L_s) + r_s} \quad (2)$$

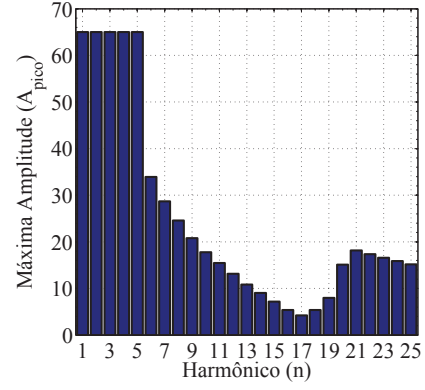


Fig. 3. Limites de corrente de pico do conversor para cada harmônico, considerando a variação paramétrica proposta.

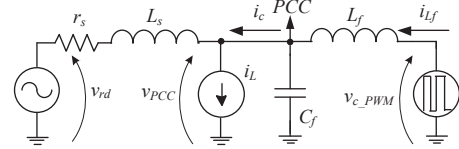


Fig. 4. Modelo da planta de harmônicas e planta de corrente.

$$C_i(s) = 4,2 \cdot 10^4 \frac{\frac{s}{2\pi 400} + 1}{\frac{s^2}{2\pi 9000} + s} \quad (3)$$

A Fig. 5 apresenta o diagrama de bode da função de transferência de malha aberta (FTMA) de corrente com o controlador de corrente implementado. A banda passante da malha ficou próxima a 7 kHz, possuindo boa rejeição à distúrbios e rastreamento de referência até 1,5 kHz. Não é necessário erro nulo a qualquer referência por parte do controlador de corrente, pois os controladores de tensão externos modificam as respectivas referências de corrente até atingir a ação de controle necessária nas operações do DMRQT. Um único controlador PI foi suficiente para estabilizar toda a faixa de parâmetros proposta nesse trabalho.

C. Controle de harmônicas de tensão

Para a mitigação de harmônicas foi utilizado um somatório de filtros ressonantes na 3^a, 5^a, 7^a e 9^a harmônicas. Visando desacoplamento entre a malha de harmônicas e as demais malhas de tensão, há um zero na origem para que o conversor não atue no nível CC e na frequência fundamental e é utilizado um sinal em fase com v_{PCC} , provido do PLL, como referência v_h^* , reduzindo o erro na frequência fundamental e consequentemente reduzindo a ação de controle correspondente.

O ganho da malha de harmônicas foi ajustado de forma que o módulo da FTMA fique acima de 0 dB somente nas frequências de interesse, reduzindo a banda passante da malha e reduzindo sua velocidade de resposta transitória, sendo mais lenta que a malha de corrente, assim desacoplando ambas as malhas e permitindo baixas harmônicas de tensão em regime permanente. A função de transferência do controlador de

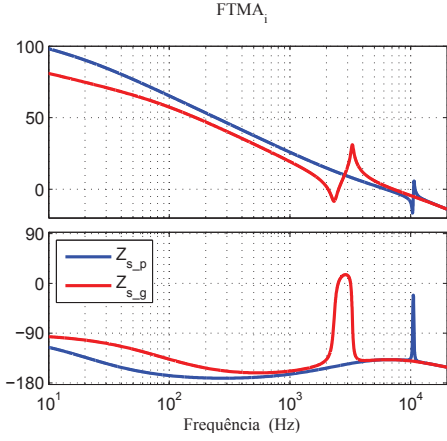


Fig. 5. Diagramas de bode da FTMA de corrente com o controlador. Para impedância série equivalente mínima (Z_{s-p}) e máxima (Z_{s-g})

harmônicas de tensão C_{Vh} é mostrada em (4), onde a transformada bilinear foi utilizada para discretizar o controlador. Os parâmetros utilizados na implementação do controlador C_{Vh} são: $Q = 5000$, $K_h(k) = \{2, 5; 1; 0, 5; 0, 15\}$ e $\omega_0 = 2\pi f_{rd}$.

$$C_{Vh}(s) = \sum_{k=3,5,7,9} K_h(k) \frac{s \frac{(k\omega_0)^2}{Q}}{s^2 + \frac{k\omega_0}{Q} + (k\omega_0)^2} \quad (4)$$

A limitação das referências de corrente é desejada, pois limita também i_{Lf} independentemente da tensão v_{PCC} , protegendo o conversor. Para limitar as referências i_{cc}^* , i_0^* e i_{g0}^* basta limitar a amplitude dos sinais dos respectivos controladores C_{dif} , C_{total} e C_{rms} , porém ao utilizar a mesma técnica para i_h^* a limitação ficará muito elevada ou muito baixa para os limites da Fig. 3. Ao utilizar filtros ressonantes é possível limitar a ação de controle de cada filtro do somatório (4) separadamente e somar as ações de controle após os limitadores, assim é possível diferenciar a ação de controle em cada harmônico, utilizando a máxima capacidade do conversor sem ultrapassar os limites de (1). Apesar dessa análise, este trabalho não implementou técnicas de saturação nos filtros ressonantes.

A planta de tensão G_v é apresentada em (5) e os diagramas de bode das FTMA de harmônicas são mostrados na Fig. 6. As mesmas consideram a atuação da malha fechada de corrente em cascata com a planta de tensão.

$$G_v = \frac{v_{PCC}(s)}{i_{Lf}(s)} = \frac{s(L_{gd}) + r_{gd}}{s^2(C_f L_{gd}) + s(C_f r_{gd}) + 1} \quad (5)$$

D. Interação entre malhas de controle

A malha de tensão diferencial produz um nível de corrente CC que praticamente não altera a amplitude de tensão no PCC, não carrega o barramento e não produz harmônicas. A malha de tensão total produz i_d , que não desequilibra o barramento CC, não gera harmônicas e praticamente não altera a amplitude de v_{PCC} . A atuação de malha de controle da amplitude de v_{PCC} não altera a amplitude ou equilíbrio do barramento CC e

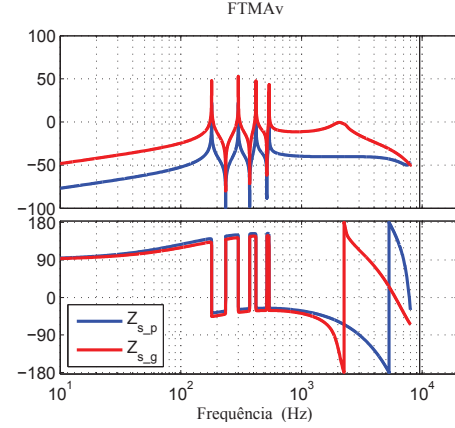


Fig. 6. Diagramas de bode das FTMA de harmônicas com o controlador. Para impedância série equivalente mínima (Z_{s-p}) e máxima (Z_{s-g})

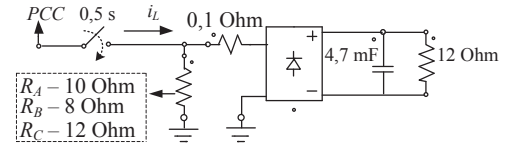


Fig. 7. Diagrama monofásico da carga utilizada na simulação do esquema de controle proposto.

não produz harmônicas, portanto também não interage com as demais malhas. A malha de harmônicas não altera as tensões médias do barramento ou a componente fundamental da tensão do PCC. Assim, para que no projeto de controle não haja iteração entre malhas, basta que as malhas de tensão sejam relativamente muito mais lentas que a malha de corrente, onde a corrente de referência será "instantaneamente" rastreada e o desacoplamento das malhas de tensão ocorrerão naturalmente, facilitando o projeto dos controladores. Porém, caso o PLL não possua bom desempenho poderá haver iteração entre as malhas que atuam na corrente fundamental.

III. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

Para comprovar o funcionamento de todo esquema de controle o circuito foi simulado no software PSIM utilizando a máxima impedância série equivalente da rede Z_{s-g} e com a carga apresentada na Fig. 7, onde as resistências R_A , R_B e R_C promovem um desequilíbrio entre as fases A, B e C e o restante do circuito é replicado para as três fases. A carga possui parte linear resistiva e não linear com retificadores com filtro capacitivo puro, onde a mesma foi comutada em 0,5 segundos. Serão apresentadas as tensões e correntes do sistema com e sem o DMRQT em regime permanente, a análise harmônica das correntes da fase C que possui a maior distorção harmônica de tensão (DHT) dentre as três fases e o comportamento do conversor no transitório de carga, em 0,5 segundos.

As formas de onda de v_{PCC} , correntes da rede i_{rd} , que são idênticas a i_L , sem o DMRQT são mostradas na Fig. 8. Nota-se que a máxima corrente de pico da carga é de aproximadamente 100 A.

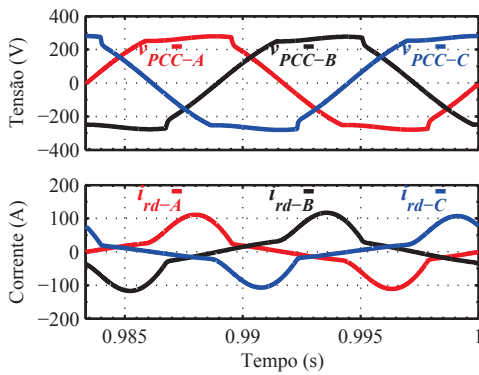


Fig. 8. Tensões da rede (v_{PCC}), correntes de rede (i_{rd}) (idênticas as correntes de carga i_L) do sistema sem o DMRQT. As tensões das fases A, B e C são respectivamente 208,5 V, 206,8 V e 210,1 V.

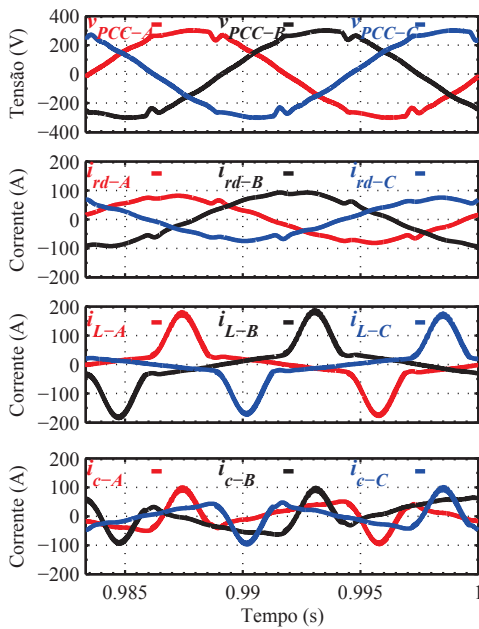


Fig. 9. Tensão da rede (v_{PCC}), corrente de rede (i_{rd}), corrente de carga (i_L) e corrente do conversor (i_c) do sistema com o DMRQT. Todas as tensões do PCC estão reguladas em 209,7 V.

As formas de onda de v_{PCC} , correntes da rede i_{rd} , i_L e correntes do conversor i_c com o DMRQT são mostradas na Fig. 9. Nota-se que a máxima corrente de pico da carga é de aproximadamente 200 A, muito superior a corrente i_L sem o conversor, isso deve-se a baixa impedância do conversor para as harmônicas. A potência da fase C na rede é de 10,4 kVA com fator de potência (fp) 0,99, enquanto a carga consome 13,1 kVA com fp 0,78 e o DMRQT processa 7,9 kVAR para regular a magnitude e as harmônicas da tensão do PCC.

A Tabela IV representa a grande redução da DHT com a inserção do DMRQT, lembrando que ao inserir o DMRQT as correntes harmônicas se elevam substancialmente, basta analisar o incremento da corrente de pico dos retificadores.

Para analisar a compensação harmônica do DMRQT a Fig. 10 apresenta o conteúdo harmônico, até a 25ª harmônica, das

TABELA IV
AVALIAÇÃO DA DHT DA TENSÃO COM A INSERÇÃO DO DMRQT

Parâmetro /Elemento	DHT v_{PCC}	DHT v_{PCC}
	SEM DMRQT (%)	COM DMRQT (%)
Fase A	8,4	3,6
Fase B	8,4	3,4
Fase C	8,5	3,8

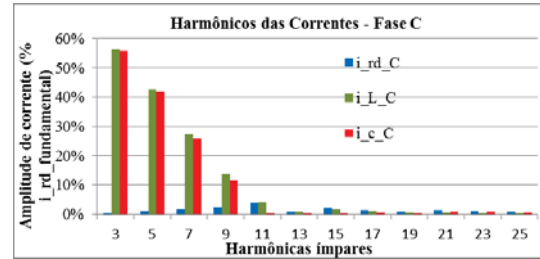


Fig. 10. Análise harmônica da corrente da rede i_{rd} em azul, corrente de carga i_L em verde e da corrente do conversor i_c em vermelho.

correntes i_{rd} , i_L e i_c da fase C. É visto que há baixíssima circulação de harmônicas na rede, pois as magnitudes das harmônicas absorvidas pelo conversor (até a 9ª harmônica) são similares as magnitudes das harmônicas geradas pela carga.

O comportamento do DMRQT sob transitório é apresentado na Fig. 11, com os valores instantâneos e eficazes de v_{PCC} , a corrente i_c e a tensão total do barramento CC (V_{total}) durante a inserção de carga. É visto que a tensão eficaz no PCC é regulada em um tempo muito inferior a 3 segundos, assim seu valor é classificado como adequado apesar do afundamento momentâneo de tensão (0,68 pu (150 V) em 0,5 s). A dinâmica reduzida na malha de harmônicas permite uma corrente de 100 A de pico, não sendo excessiva para um transitório. A tensão V_{total} se mantém regulada e possui ondulação equivalente as harmônicas compensadas pelo DMRQT.

Em quatro ciclos de rede o DMRQT está próximo de sua operação em regime, tempo muito inferior aos 3 segundos exigidos pela ANEEL.

IV. RESULTADOS EXPERIMENTAIS PRELIMINARES

A Fig. 12 apresenta resultados experimentais preliminares da malha de harmônicas para uma fase, sem compensação de reativos e com potência e tensão reduzida. Apresentando as formas de onda de v_{PCC} de i_{rd} com e sem o DMRQT e das correntes i_c e i_L com o DMRQT. Os resultados comprovam o funcionamento da técnica, a DHT passou de 8,63% para 3,33% com a inserção do DMRQT. Foi utilizado o osciloscópio TPS 2014 da Tektronix para aquisição dos resultados.

V. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou um esquema de controle para um DSTATCOM controlado em corrente utilizado na regulação da magnitude de tensão no ponto de conexão de carga (PCC) através de reativos e também mitiga harmônicas de tensão

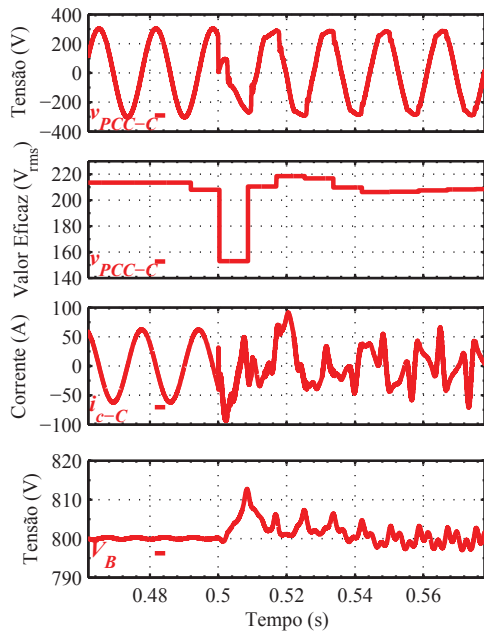


Fig. 11. Valor instantâneo e eficaz da tensão v_{PCC} (fase C), corrente i_C (fase C) e tensão total do barramento CC V_{total} durante a inserção de carga.

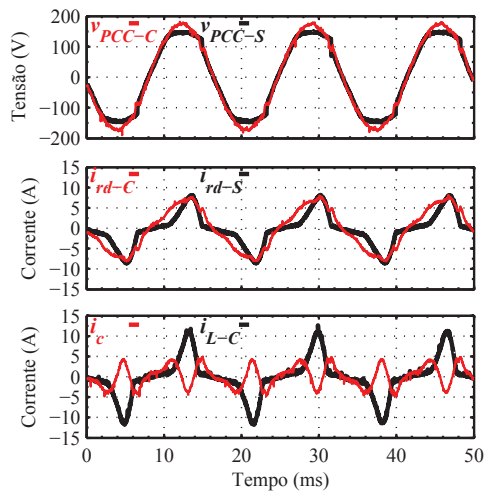


Fig. 12. Formas de ondas experimentais de v_{PCC} e i_{rd} com (v_{PCC-C} , i_{rd-C}) e sem (v_{PCC-S} , i_{rd-S}) o DMRQT e de i_C e i_L com o DMRQT.

através da detecção da tensão no PCC. O trabalho apresentou todo o esquema de controle da solução, uma análise dos limites físicos de injeção de corrente na rede, os modelos das plantas de corrente e tensão do PCC, o projeto desses controladores, os resultados de simulação do sistema completo utilizando uma carga não linear e resultados experimentais preliminares.

A mitigação de harmônicas de tensão sem a necessidade da leitura de correntes da rede ou da carga viabiliza a solução, pois não exige o conhecimento da localização exata da fonte de harmônicas. Ela é feita através de filtros ressonantes que geram referências de correntes necessárias para compensar as harmônicas de cargas próximas ao PCC, onde um controlador

de corrente PI analógico é capaz de rastrear tais referências. A utilização da tensão fundamental como referência na malha de harmônicas permite a não inclusão de um filtro rejeita faixa no controlador dessa malha.

Uma análise harmônica demonstrou a eficácia da estratégia de controle, onde as harmônicas de carga foram quase totalmente eliminadas. Os resultados experimentais preliminares indicam o sucesso da técnica.

A capacidade de regulação da tensão através de reativos foi mantida, assim como a regulação do barramento CC.

A potência de carga utilizada é condizente com uma rede atual pois há divisão de potência entre os ramos da rede.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o suporte da UDESC, CAPES e CELESC por viabilizarem a realização desse trabalho.

REFERÊNCIAS

- [1] *Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST*, Agência Nacional de Energia Elétrica Std., 2012.
- [2] *IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems*, IEEE 519 Std.
- [3] H. Akagi, "New trends in active filters for improving power quality," in *Power Electronics, Drives and Energy Systems for Industrial Growth, 1996., Proceedings of the 1996 International Conference on*, vol. 1, Jan 1996, pp. 417–425 vol.1.
- [4] J. Rocabert, A. Luna, F. Blaabjerg, and P. Rodríguez, "Control of power converters in ac microgrids," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 27, no. 11, pp. 4734–4749, Nov 2012.
- [5] A. Chandra, B. Singh, B. Singh, and K. Al-Haddad, "An improved control algorithm of shunt active filter for voltage regulation, harmonic elimination, power-factor correction, and balancing of nonlinear loads," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 15, no. 3, pp. 495–507, May 2000.
- [6] T. Jin, L. Li, and K. Smedley, "A universal vector controller for three-phase pfc, apf, statcom, and grid-connected inverter," in *Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2004. APEC '04. Nineteenth Annual IEEE*, vol. 1, 2004, pp. 594–600 Vol.1.
- [7] Y. A. R. I. Mohamed and E. El-Saadany, "A control scheme for pwm voltage-source distributed-generation inverters for fast load-voltage regulation and effective mitigation of unbalanced voltage disturbances," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 55, no. 5, pp. 2072–2084, May 2008.
- [8] N. Tummuru, M. Mishra, and S. Srinivas, "Multifunctional vsc controlled microgrid using instantaneous symmetrical components theory," *Sustainable Energy, IEEE Transactions on*, vol. 5, no. 1, pp. 313–322, Jan 2014.
- [9] C. A. C. Cavaliere, "Análise e modelagem de statcom considerando operação em sistema desbalanceado," Ph.D. dissertation, COPPE/UFRJ, Fevereiro 2008, COPPE.
- [10] G. W. Moon, "Predictive current control of distribution static compensator for reactive power compensation," *Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings-*, vol. 146, no. 5, pp. 515–520, Sep 1999.
- [11] M. Aggarwal, S. K. Gupta, M. Madhusudan, and G. Kasal, "D-statcom control in low voltage distribution system with distributed generation," in *Emerging Trends in Engineering and Technology (ICETET), 2010 3rd International Conference on*, Nov 2010, pp. 426–429.
- [12] B. Singh, A. Adya, A. Mittal, and J. R. P. Gupta, "Analysis, simulation and control of dstatcom in three-phase, four-wire isolated distribution systems," in *Power India Conference, 2006 IEEE*, 2006, p. 6 pp.
- [13] P.-C. Tan, R. Morrison, and D. Holmes, "Voltage form factor control and reactive power compensation in a 25-kv electrified railway system using a shunt active filter based on voltage detection," *Industry Applications, IEEE Transactions on*, vol. 39, no. 2, pp. 575–581, Mar 2003.
- [14] R. de Camargo and H. Pinheiro, "Three-phase four-wire shunt active filter to reduce voltage and current distortions in distribution systems," in *IEEE Industrial Electronics, IECON 2006 - 32nd Annual Conference on*, Nov 2006, pp. 1884–1889.

- [15] M. Aredes, J. Hafner, and K. Heumann, "Three-phase four-wire shunt active filter control strategies," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 12, no. 2, pp. 311–318, Mar 1997.
- [16] J. Miret, M. Castilla, J. Matas, J. Guerrero, and J. Vasquez, "Selective harmonic-compensation control for single-phase active power filter with high harmonic rejection," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 56, no. 8, pp. 3117–3127, Aug 2009.
- [17] P. Mattavelli and F. Marafao, "Repetitive-based control for selective harmonic compensation in active power filters," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 51, no. 5, pp. 1018–1024, Oct 2004.
- [18] A. Yepes, F. Freijedo, J. Doval-Gandoy, O. Lopez, J. Malvar, and P. Fernandez-Comesana, "On the discrete-time implementation of resonant controllers for active power filters," in *Industrial Electronics, 2009. IECON '09. 35th Annual Conference of IEEE*, Nov 2009, pp. 3686–3691.
- [19] R. Costa-Castelló, R. Grino, and E. Fossas, "Odd-harmonic digital repetitive control of a single-phase current active filter," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 19, no. 4, pp. 1060–1068, July 2004.
- [20] J. Fei, T. Li, and S. Zhang, "Indirect current control of active power filter using novel sliding mode controller," in *Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL), 2012 IEEE 13th Workshop on*, June 2012, pp. 1–6.
- [21] G. Weiss, Q.-C. Zhong, T. Green, and J. Liang, "H infin; repetitive control of dc-ac converters in microgrids," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 19, no. 1, pp. 219–230, Jan 2004.
- [22] T.-L. Lee and S.-H. Hu, "Discrete frequency-tuning active filter to suppress harmonic resonances of closed-loop distribution power systems," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 26, no. 1, pp. 137–148, Jan 2011.
- [23] D. Nedeljkovic, M. Nemeč, K. Drobnic, and V. Ambrožic, "Direct current control of active power filter without filter current measurement," in *Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, 2008. SPEEDAM 2008. International Symposium on*, June 2008, pp. 72–76.
- [24] R. Grino, R. Cardoner, R. Costa-Castello, and E. Fossas, "Digital repetitive control of a three-phase four-wire shunt active filter," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 54, no. 3, pp. 1495–1503, June 2007.
- [25] H. Akagi, "Control strategy and site selection of a shunt active filter for damping of harmonic propagation in power distribution systems," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 12, no. 1, pp. 354–363, Jan 1997.
- [26] P. Jintakosonwit, H. Fujita, and H. Akagi, "Control and performance of a fully-digital-controlled shunt active filter for installation on a power distribution system," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 17, no. 1, pp. 132–140, Jan 2002.
- [27] F. Freijedo, J. Doval-Gandoy, O. Lopez, P. Fernandez-Comesana, and C. Martinez-Penalver, "A signal-processing adaptive algorithm for selective current harmonic cancellation in active power filters," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 56, no. 8, pp. 2829–2840, Aug 2009.
- [28] H. Akagi, H. Fujita, and K. Wada, "A shunt active filter based on voltage detection for harmonic termination of a radial power distribution line," in *Industry Applications Conference, 1998. Thirty-Third IAS Annual Meeting. The 1998 IEEE*, vol. 2, Oct 1998, pp. 1393–1399 vol.2.
- [29] Y. Z. Huan and Y. Du, "A novel shunt active power filter based on voltage detection for harmonic voltage mitigation," in *Industry Applications Conference, 2007. 42nd IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2007 IEEE*, Sept 2007, pp. 1616–1620.
- [30] M. Salo and H. Tuusa, "A novel open-loop control method for a current-source active power filter," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 50, no. 2, pp. 313–321, Apr 2003.
- [31] Y. Sato, H. Chigira, and T. Kataoka, "A new control method for active power filters with voltage detection," in *Power Conversion Conference - Nagaoka 1997., Proceedings of the*, vol. 1, Aug 1997, pp. 169–174 vol.1.
- [32] H. Akagi, "Active harmonic filters," *Proceedings of the IEEE*, vol. 93, no. 12, pp. 2128–2141, Dec 2005.
- [33] M. Aredes and L. F. C. Monteiro, "A control strategy for shunt active filter," in *Harmonics and Quality of Power, 2002. 10th International Conference on*, vol. 2, Oct 2002, pp. 472–477 vol.2.
- [34] Y. Sato, T. Kawase, M. Akiyama, and T. Kataoka, "A control strategy for general-purpose active filters based on voltage detection," *Industry Applications, IEEE Transactions on*, vol. 36, no. 5, pp. 1405–1412, Sep 2000.
- [35] A. Etemadi and R. Iravani, "Overcurrent and overload protection of directly voltage-controlled distributed resources in a microgrid," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 60, no. 12, pp. 5629–5638, Dec 2013.
- [36] H. Fujita and H. Akagi, "Voltage-regulation performance of a shunt active filter intended for installation on a power distribution system," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 22, no. 3, pp. 1046–1053, May 2007.
- [37] C. Gehrke, A. Lima, and A. Oliveira, "Controlling harmonics in electrical power systems for satisfying total and individual harmonic distortion constraints," in *Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2014 Twenty-Ninth Annual IEEE*, March 2014, pp. 3342–3348.
- [38] J. He, Y. W. Li, F. Blaabjerg, and X. Wang, "Active harmonic filtering using current-controlled, grid-connected dg units with closed-loop power control," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 29, no. 2, pp. 642–653, Feb 2014.
- [39] T. Hornik and Q.-C. Zhong, "Hinf; repetitive current-voltage control of inverters in microgrids," in *IECON 2010 - 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, Nov 2010, pp. 3000–3005.
- [40] C. Kumar and M. Mishra, "A multifunctional dstatcom operating under stiff source," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 61, no. 7, pp. 3131–3136, July 2014.
- [41] T. Liu, X. Hao, X. Yang, M. Zhao, Q. Huang, and L. Huang, "A novel repetitive control scheme for three-phase grid-connected inverter with lcl filter," in *Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC), 2012 7th International*, vol. 1, June 2012, pp. 335–339.
- [42] R. Mastromauro, M. Liserre, and A. Dell'Aquila, "Control issues in single-stage photovoltaic systems: Mppt, current and voltage control," *Industrial Informatics, IEEE Transactions on*, vol. 8, no. 2, pp. 241–254, May 2012.
- [43] Y. A. R. I. Mohamed and E. El-Saadany, "Hybrid variable-structure control with evolutionary optimum-tuning algorithm for fast grid-voltage regulation using inverter-based distributed generation," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 23, no. 3, pp. 1334–1341, May 2008.
- [44] Y.-R. Mohamed, "Mitigation of dynamic, unbalanced, and harmonic voltage disturbances using grid-connected inverters with lcl filter," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 58, no. 9, pp. 3914–3924, Sept 2011.
- [45] Q.-C. Zhong, "Power delivery to a current source and reduction of voltage harmonics for inverters," in *American Control Conference (ACC), 2012*, June 2012, pp. 5783–5788.
- [46] S. Arya, B. Singh, A. Chandra, and K. Al-Haddad, "Power factor correction and zero voltage regulation in distribution system using dstatcom," in *Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES), 2012 IEEE International Conference on*, Dec 2012, pp. 1–6.
- [47] D. Vilathgamuwa, P. C. Loh, and Y. Li, "Protection of microgrids during utility voltage sags," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 53, no. 5, pp. 1427–1436, Oct 2006.
- [48] H. Fujita and H. Akagi, "Voltage regulation performance of a shunt active filter intended for installation on a power distribution system," in *Power Electronics Specialists Conference, 2005. PESC '05. IEEE 36th*, June 2005, pp. 2578–2584.
- [49] P. C. Loh, M. Newman, D. Zmood, and D. Holmes, "A comparative analysis of multiloop voltage regulation strategies for single and three-phase ups systems," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 18, no. 5, pp. 1176–1185, Sept 2003.
- [50] N. Abdel-Rahim and J. Quaicoe, "Analysis and design of a multiple feedback loop control strategy for single-phase voltage-source ups inverters," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 11, no. 4, pp. 532–541, Jul 1996.
- [51] S.-L. Jung, H.-S. Huang, M.-Y. Chang, and Y.-Y. Tzou, "Dsp-based multiple-loop control strategy for single-phase inverters used in ac power sources," in *Power Electronics Specialists Conference, 1997. PESC '97 Record., 28th Annual IEEE*, vol. 1, Jun 1997, pp. 706–712 vol.1.
- [52] J. da Cunha, W. de Oliveira Rossi, A. Batschauer, and M. Mezaroba, "A simple control scheme to a voltage regulator based in a current controlled statcom," in *Power Electronics Conference (COBEP), 2013 Brazilian*, Oct 2013, pp. 1212–1218.
- [53] T. P. Enderle, G. da Silva, C. Fischer, R. C. Beltrame, L. Schuch, V. F. Montagner, and C. Rech, "D-statcom applied to single-phase distribution networks: Modeling and control," in *IECON 2012 - 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, Oct 2012, pp. 321–326.