

Estratégia para Mitigação dos Harmônicos de Seqüência Zero em Sistemas Desequilibrados a Quatro Fios

Carlos Henrique da Silva, Luiz Eduardo Borges da Silva, Rondineli R. Pereira,
Germano Lambert-Torres e Edson Hideki Takauti

Resumo—Este artigo discute as limitações do Filtro Ativo Série para sistemas trifásicos a quatro fios em regime desequilibrado e propõe a inserção de uma impedância ativa série no condutor neutro. O controle desta impedância ativa é feito através do Controlador Síncrono Modificado (MSRFC) para mitigar o fluxo das componentes harmônicas de seqüência zero. O desempenho do sistema combinado, constituído por dois filtros ativos série, é simulado com e sem a inserção do filtro ativo série no condutor neutro, e os resultados são apresentados. A simulação confirma a viabilidade da proposição e a discussão mostra a importância do uso da topologia proposta quando filtros ativos série baseados no Controlador Síncrono Padrão (SRFC) são utilizados em sistemas desequilibrados a quatro fios.

Palavras-Chaves—qualidade de energia, distorção harmônica, sistema desequilibrados, filtro ativo.

I. INTRODUÇÃO

A literatura relativa a Filtros Ativos Série baseados em Referência Síncrona (SRF) atem-se geralmente à análise do sistema trifásico a três fios em regime desequilibrado [1-3]. Os sistemas de distribuição trifásicos a quatro fios, entretanto, tem sido mais amplamente empregados para proporcionar altos níveis de potência em baixa tensão. A mudança do regime de operação nos últimos anos devido em parte à proliferação de aplicações envolvendo eletrônica de potência, e ao desequilíbrio inerente dos sistemas de distribuição de energia elétrica, aumentou significativamente as componentes de seqüência zero circulando pelo neutro. Esta condição ocasiona a sobrecarga dos transformadores dos sistemas de distribuição e do condutor neutro. Quando se utiliza os Controladores Síncronos tradicionais em regime desequilibrado é gerado um erro na detecção dos harmônicos, visto que o controlador não é capaz de detectar todos os harmônicos nas fases do sistema [16, 17]. Os erros produzidos pelos controladores síncronos devido ao desequilíbrio podem resultar em um balanceamento indesejado das cargas [4].

Os estudos de Filtros Ativos Série e Paralelo para sistemas

de distribuição trifásicos a quatro fios já foram apresentados [5,6], mas nenhum deles foi desenvolvido a partir de Controladores Síncronos. Duas recentes publicações [7] sugerem a inserção de um Filtro Ativo exclusivamente para o condutor neutro. O primeiro deles trabalha como um capacitor para o circuito de seqüência zero para a detecção da tensão do neutro utilizando a Transformada Hilbert. O outro realiza a supressão da corrente harmônica excessiva no neutro utilizando uma adaptação da Transformada Síncrona para um sistema monofásico.

Neste artigo, são discutidas as limitações da SRF para sistemas trifásicos a quatro fios em regime desequilibrado. A solução proposta é um sistema combinado composto por Filtros Ativos Série, um Filtro Passivo Paralelo e um Filtro Ativo Série adicional no condutor neutro (SAFg). Este filtro adicional é controlado através da estratégia da Referência Síncrona Modificada (MSRF), atuando nas componentes de seqüência zero. A técnica proposta é justificada pelo fato de que o principal objetivo da filtragem harmônica não é alcançado, ou seja, a obtenção de níveis adequados de distorção harmônica de acordo com a norma IEEE 519. As simulações da técnica proposta enfatizam que a MSRF é essencial para a mitigação completa das componentes harmônicas em sistemas desequilibrados a quatro fios.

II. DESEQUILÍBRIO E DISTORÇÃO HARMÔNICA

No regime desequilibrado, os harmônicos ímpares não seguem a teoria das componentes de seqüência [8]. Entretanto, a partir da teoria das componentes simétricas, um sistema harmônico desequilibrado pode ser decomposto em vários sistemas equilibrados de mesma ordem harmônica e de seqüências zero, positiva e negativa respectivamente (1).

$$\begin{bmatrix} I_h^0 \\ I_h^+ \\ I_h^- \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{ah} \\ I_{bh} \\ I_{ch} \end{bmatrix} \quad a = \sqrt[3]{120^\circ} \quad (1)$$

Correntes trifásicas em regime desequilibrado são diferentes em amplitude e fase. Consequentemente, quando são somadas não se anulam (adição de fasores), e uma quantidade finita de corrente passa pelo condutor neutro. O aumento do grau de desequilíbrio resulta na elevação da amplitude dos harmônicos não-característicos. Este fenômeno

Os autores da UNIFEI gostariam de agradecer o apoio financeiro proporcionado pelos seguintes órgãos de fomento: CNPq, Fapemig e CAPES.

C. H. da Silva, L. E. Borges da Silva, R. R. Pereira e G. Lambert-Torres são ligados à Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), Itajubá, 37.500-503, Minas Gerais (e-mail: {leborges, germano}@unifei.edu.br).

E. H. Takauti é engenheiro da Energias do Brasil - Bandeirante, São Paulo, São Paulo (e-mail: hideki@enbr.com.br).

é seguido por uma diminuição na amplitude dos harmônicos característicos correspondentes [8].

Quando um conversor de 6 pulsos opera em regime equilibrado, é visto que seus harmônicos característicos seguem a regra $6n \pm 1$ $n=1,2,3\dots$. No entanto, se o sistema de potência for submetido a qualquer tipo de desequilíbrio, pode ser notado o surgimento dos harmônicos não-característicos.

O desequilíbrio imposto ao sistema de potência neste artigo é 9%, (I_-/I_+) , obtido pela adição de uma carga monofásica no barramento trifásico. A carga monofásica e a carga trifásica são conversores do tipo fonte de tensão.

III. O COMPORTAMENTO DA SRF SOB REGIME DESEQUILIBRADO

No sistema analisado, trifásico a quatro fios, as componentes harmônicas de seqüência zero são não-nulas. Apesar disso, na Transformada Park apenas as componentes de seqüência positiva e negativa são modificadas em freqüência [9]. Aplicando a Transformada Park em (1):

$$\begin{bmatrix} I_d(t) \\ I_q(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_d^+(t) \\ I_q^+(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} I_d^-(t) \\ I_q^-(t) \end{bmatrix} \quad (2)$$

Onde: $I_d^+(t), I_q^+(t)$ e $I_d^-(t), I_q^-(t)$ representam respectivamente os componentes Park de seqüência positiva e negativa de um sistema equilibrado.

Um controlador de seqüência positiva e um de seqüência negativa são necessários. O sistema de controle usado para a implementação do sistema combinado de filtros ativos é descrito em [10].

Um isolador dinâmico para a componente fundamental de seqüência negativa da corrente de carga é implementado através de um controlador síncrono de seqüência negativa. Isto assegura que o filtro ativo série não irá compensar a componente fundamental de seqüência negativa da fonte/carga e deverá realizar apenas a sua função principal - a isolamento harmônica - evitando que o filtro ativo promova o balanceamento da carga, o que é indesejável, como mencionando em [4].

Como mencionado, apenas as componentes harmônicas de seqüência positiva e negativa são modificadas em freqüência. As componentes harmônicas de seqüência zero são ignoradas pela SRF. É necessário, portanto, criar um ambiente que cancela o fluxo das componentes harmônicas de seqüência zero já que elas usam o condutor neutro para poderem circular.

A Figura 1 mostra o sistema combinado proposto, o qual é composto por dois Filtros Ativos Série (SAF) e um Filtro Passivo Paralelo (SPF). O primeiro filtro ativo (SAF1) é colocado entre a fonte e a carga e funciona como um isolador harmônico. O segundo filtro ativo (SAF2) é conectado em série com o filtro passivo e garante que a tensão nos terminais da carga estará livre de distorções. Isto é obtido somando-se os harmônicos em fase oposta. Juntos, eles injetam tensões harmônicas no sistema, $Vsaf_1$ e $Vsaf_2$, respectivamente.

A impedância ativa é consequência da superposição de cada componente harmônica detectada na fonte de corrente.

$$Vsaf_1 = K_1 \cdot \sum_{h=2}^{\infty} Ish(h) \quad (3)$$

Para cada componente harmônica da fonte de corrente Ish , o SAF1 cria uma impedância harmônica K_1 , idealmente infinita, que isola a carga da corrente. Para sistemas desequilibrados K_1^+ , K_1^- e K_1^0 são respectivamente as impedâncias harmônicas ativas de seqüência positiva, negativa e zero. Se uma componente harmônica não é detectada, isto quer dizer que ela não será isolada da fonte.

$$Vscf_1 = K_1 \cdot \left[\sum_{h=2}^{\infty} Ish_{pos}(h) + \sum_{h=2}^{\infty} Ish_{neg}(h) + \sum_{h=2}^{\infty} Ish_{zero}(h) \right] \quad (4)$$

Como a SRF não detecta as componentes de seqüência zero da corrente harmônica da fonte, o SAF1 apresenta impedância nula para estas componentes, $K_1^0 = 0$. Logo, não sendo possível implementar a resistência harmônica para as componentes de seqüência zero, elas continuam circulando pelo sistema [15].

Assim como o SAF1, o SAF2 é controlado através da SRF. No entanto o SAF1 é um VSI controlado por corrente, enquanto o SAF2 é um VSI controlado por tensão.

O SRFC detectará todas as componentes harmônicas, incluindo os harmônicos não característicos, para qualquer tipo de desequilíbrio no sistema de potência, desde que não haja caminho para circulação das componentes de seqüência zero.

IV. IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA COMBINADO SEM O FILTRO ATIVO NO NEUTRO

A mitigação harmônica é implementada pela isolamento harmônica entre a carga e a fonte através da impedância ativa K_1 , idealmente nula (curto-circuito) para a freqüência fundamental e alta resistência (circuito aberto) para as freqüências harmônicas. Esta impedância é inserida no sistema como uma tensão $Vsaf_1$, compensando a tensão distorcida da fonte. Esta ação elimina o fluxo de correntes harmônicas da fonte para o filtro passivo paralelo. Isto também bloqueia o fluxo de correntes harmônicas da carga para a fonte, confinando-as no filtro passivo.

De acordo com [3], [11] e [12] o comando da tensão instantânea do filtro ativo SAF1, $Vsaf_1$, é:

$$Vaf_1 = K_1 \cdot Ish \quad (5)$$

Neste caso, Ish é a corrente harmônica da fonte e K_1 é o ganho cuja dimensão é ohms. Se K_1 for infinito para a condição ideal, a corrente harmônica da fonte Ish , a tensão ac

do filtro ativo V_{saf_1} e a tensão harmônica no barramento da carga V_{brr} , são dados por:

$$I_{sh} = 0 \quad (6)$$

$$V_{brr} = -(Z_{fh} \cdot I_{lh}) \quad (7)$$

$$V_{saf_1} = V_{sh} + (Z_{fh} \cdot I_{lh}) \quad (8)$$

A potência do SAF1 é dependente da queda de tensão nos terminais do filtro passivo $Z_{fh} \cdot I_{lh}$, e da tensão harmônica da fonte V_{sh} . Para diminuir a potência do filtro ativo SAF1, a tensão harmônica no filtro passivo deverá ser minimizada. No entanto, se I_{lh} contém harmônicos fora da frequência de sintonia do filtro passivo, uma tensão harmônica significativa aparecerá nos terminais da carga.

Para evitar uma sobrecarga no SAF1, um segundo filtro SAF2 é introduzido em série com o filtro passivo. O SAF2 cancela a tensão harmônica que aparece nos terminais do filtro passivo (9). Isto acontece devido à impedância do filtro passivo não ser desprezível, o que gera um caminho de baixa impedância para as correntes harmônicas.

O comando para a tensão ac instantânea do filtro ativo SAF2 [3] V_{saf_2} é dado por:

$$V_{saf_2} = -K_2 \cdot V_{fh} \quad (9)$$

Em condições ideais de controle K_2 é unitário. V_{fh} é a tensão harmônica nos terminais do filtro passivo paralelo e I_{sh} , V_{brr} e V_{saf_2} são dados por:

$$I_{sh} = V_{sh}/Z_{sh} \quad (10)$$

$$V_{brr} = 0 \quad (11)$$

$$V_{saf_2} = V_{sh} \cdot (Z_f/Z_s) + Z_{fh} \cdot I_{lh} \quad (12)$$

As características do filtro ativo sob regime desequilibrado são descritas em [1-3, 11 e 12].

O filtro ativo série é um conversor PWM-VSI monofásico em ponte completa, aqui considerado como uma fonte ideal, controlada independentemente para compensar o desequilíbrio harmônico.

O cálculo dos ganhos K_1 e K_2 é baseado no conceito da “isolação harmônica” [14] e “cancelamento harmônico” [3], onde $I_{sh} = 0$ se $K_1 \gg |Z_s|, |Z_f|$ e $V_{brr} = 0$ se $K_2 = 1$. Nas simulações, K_1 é definido como 5Ω (6 p.u. numa base de 480V e 310KVA) e K_2 é definido como 0,8.

O filtro passivo paralelo (SPF) consiste num filtro RLC sintonizado no 5° e no 7° harmônico, estrela isolada, 76KVA por fase. Os parâmetros são mostrados na Tabela I.

TABELA I
CONSTANTES DO CIRCUITO DO FILTRO PASSIVO

Ordem	Indutância	Capacitância	Qf
5ª	1,5mH	188uF	100
7ª	1,5mH	96uF	100

As Figuras 2a a 2d mostram as correntes do sistema para 9% de desequilíbrio. Aplicando a teoria das componentes simétricas para cada corrente harmônica da carga e comparando-a com a técnica FFT para a corrente da fonte, pode ser concluído que as componentes harmônicas residuais na corrente da fonte são, principalmente, as componentes harmônicas de seqüência zero da corrente de carga não isoladas, já que apenas as impedâncias harmônicas de seqüência positiva K_1^+ e negativa K_1^- foram implementadas [15].

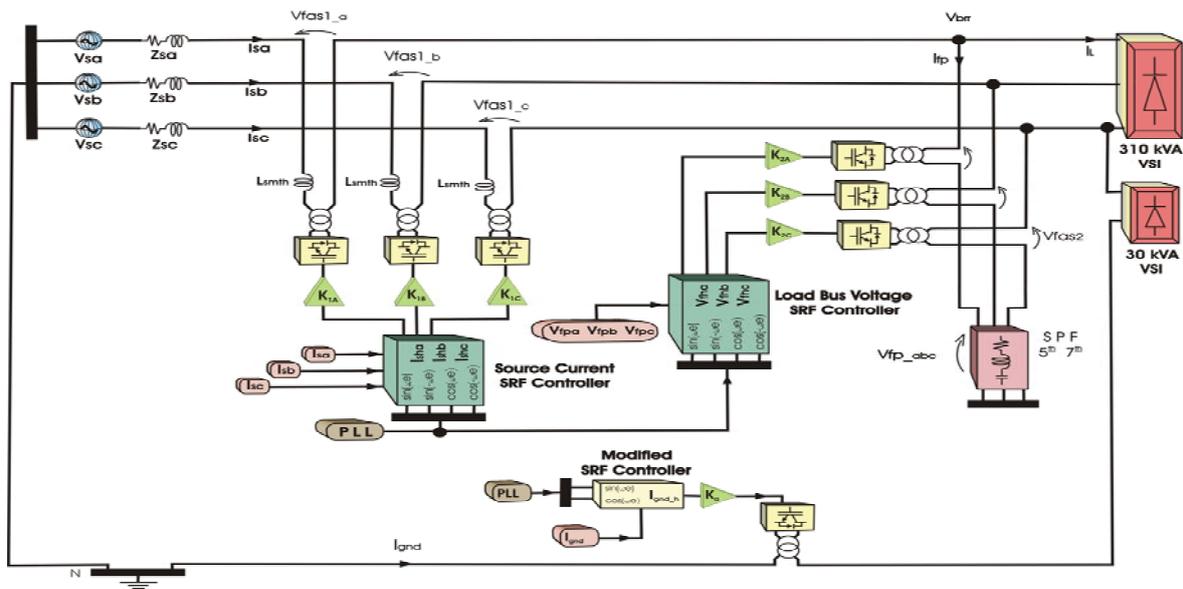


Fig 1 – Implementação do Sistema com Filtros Ativos Série

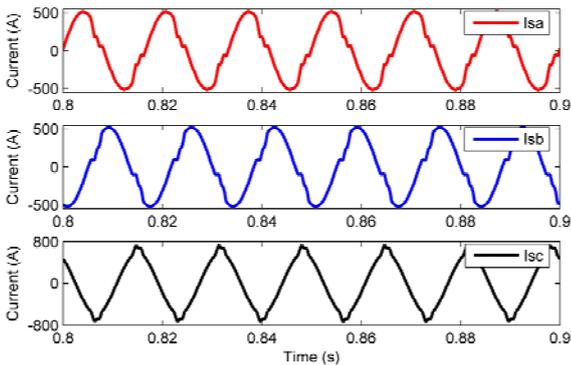


Fig. 2a – Corrente da Fonte

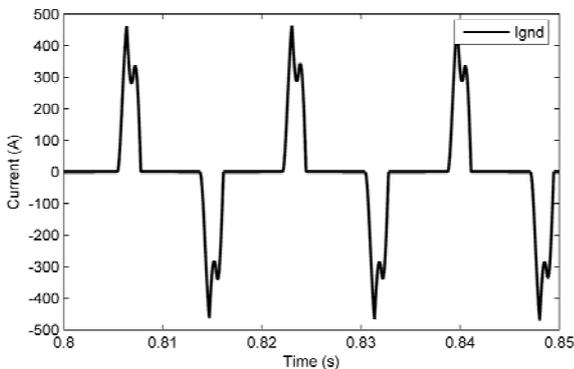


Fig. 2b: Corrente do Neutro

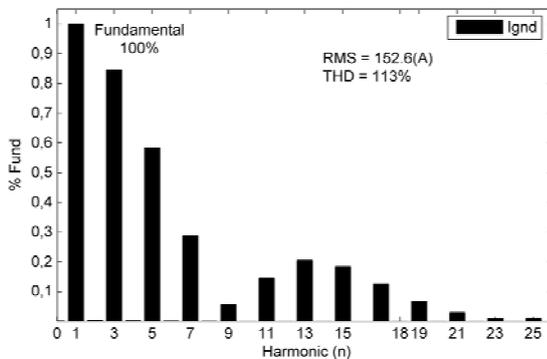


Fig. 2c: Espectro da Corrente do Neutro

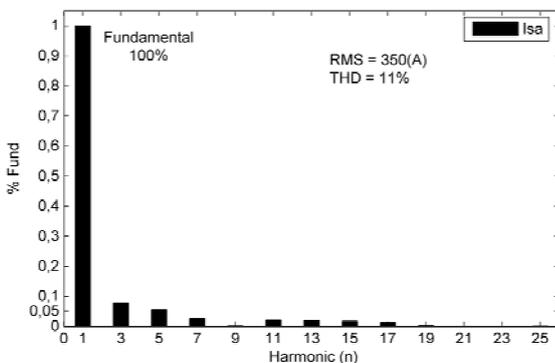
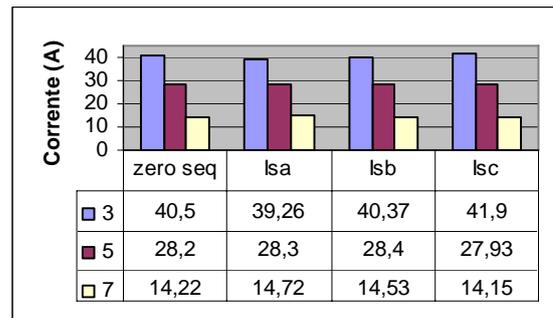


Fig. 2d: Espectro da Corrente da Fonte – Fase A

A Tabela II apresenta os resultados. Mesmo com a inserção do SAF, a corrente da fonte excedeu o limite recomendado pela IEEE 519 de taxa de distorção harmônica (THD), que é estabelecido como sendo de 5% para uma taxa de curto-circuito (SCR) menor que 20. Aqui, a corrente da fonte apresenta uma THD de 11% , 10,77% e 8,71% para as fases A, B e C respectivamente.

TABELA II
VALORES DA CORRENTE DE SEQUÊNCIA ZERO

V. IMPLEMENTAÇÃO DO FILTRO ATIVO SÉRIE DO NEUTRO

Como mencionado anteriormente, a inserção do SAFg bloqueia o fluxo das correntes harmônicas no condutor neutro, através da impedância ativa de seqüência zero, a estratégia K_1^o , forçando a corrente da fonte a enquadrar-se nas recomendações da IEEE 519. Por esta razão, o filtro ativo do neutro deverá prevenir a sobrecarga nos transformadores de distribuição, no condutor neutro e nos filtros ativos já existentes. (SAF 1,2).

A corrente harmônica do condutor neutro deverá ser detectada de acordo com o conceito a seguir, chamado de Referência Síncrona Modificada (MSRF):

Uma pseudo-transformada de Park é desenvolvida para aplicação em sistemas monofásicos. O método consiste em multiplicar os sinais medidos, simultaneamente, pelas funções seno e co-seno numa dada freqüência [13]. Esta estratégia consegue o mesmo efeito de transformação de uma componente, de certa freqüência, numa componente DC, deixando as outras como sinais AC. Após o sinal resultante passar por um filtro passa-baixas, o mesmo sofre uma transformação inversa para gerar as componentes harmônicas desejadas. Cada módulo (transformações / filtros) pode ser utilizado para a extração de componentes harmônicas específicas. Logo, as saídas para cada freqüência específica precisam ser somadas para produzir a corrente harmônica de referência para o filtro ativo [14].

No SAFg, a freqüência fundamental do neutro é escolhida para ser a componente DC, deixando as outras como sinais ac, como na transformada SRF tradicional. Uma vez que a componente fundamental I_{gnd_fo} é isolada e subtraída da corrente do neutro I_{gnd} , as componentes harmônicas de seqüência zero tornam-se disponíveis como referências para o SAFg. A Figura 3a mostra o controlador para o filtro ativo complementar no condutor neutro.

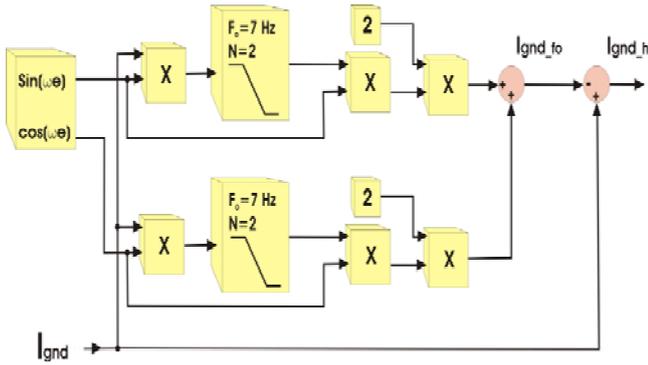


Fig. 3a: Filtro Ativo Série do Neutro

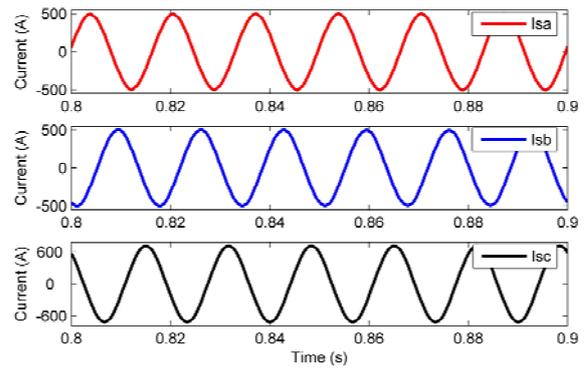


Fig. 4a: Corrente da Fonte

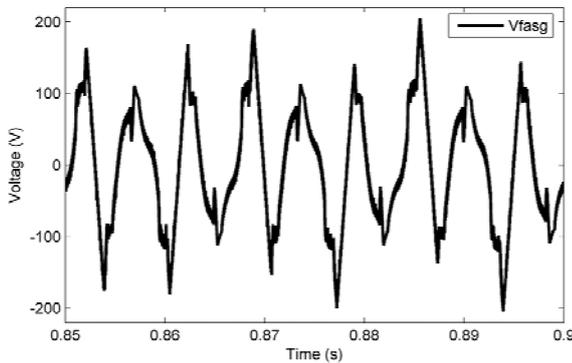


Fig. 3b: Tensão de Saída do FASg

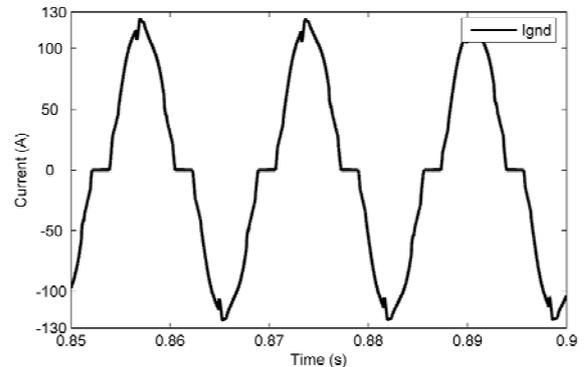


Fig. 4b: Corrente do Neutro

O SAFg também é implementado usando um conversor PWM tipo VSI de ponte-completa. O comando de saída para a tensão V_{fasg} é dado por:

$$V_{saf_g} = K_g \cdot I_{gndh} \quad (13)$$

O ganho K_g do SAFg é estabelecido como 5, de acordo com o critério usado para o ganho K_1 [11]. É importante observar que a impedância ativa do condutor neutro K_g e a impedância ativa de seqüência zero K_1^o são conceitualmente a mesma coisa. A Figura 3b mostra a tensão de saída do SAFg quando o sistema opera sob 9% de desequilíbrio.

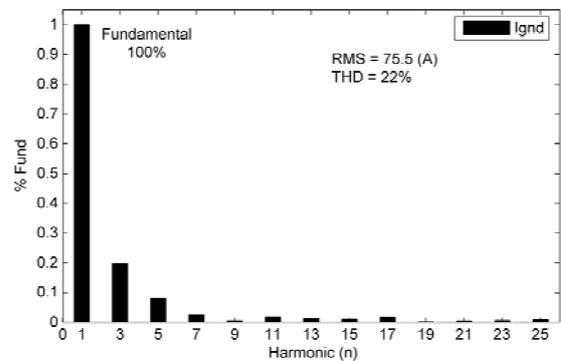


Fig. 4c: Espectro da Corrente do Neutro

VI. DESEMPENHO DO SISTEMA COMBINADO COMPLETO

As figuras 4a a 4e mostram as correntes da fonte e do neutro quando os filtros SAF1, SAF2 e SAFg operam simultaneamente.

É importante notar que mesmo com 9% de desequilíbrio, o sistema combinado atinge os limites recomendados pela norma IEEE 519.

A THD baixou de 10,96%, 10,77% e 8,71%, para 1,78%, 1,81% e 1,47%, para as fases A, B e C respectivamente. A THD da corrente do neutro passou de 113% para 22%

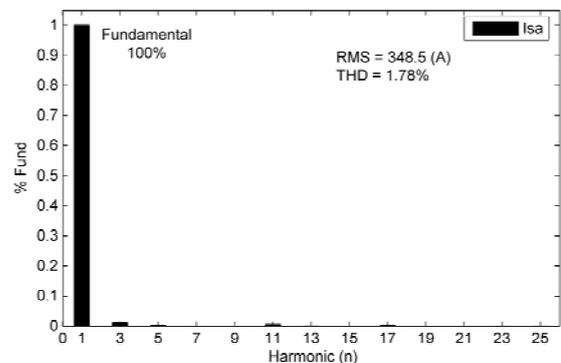


Fig. 4d: Espectro da Corrente da Fase A

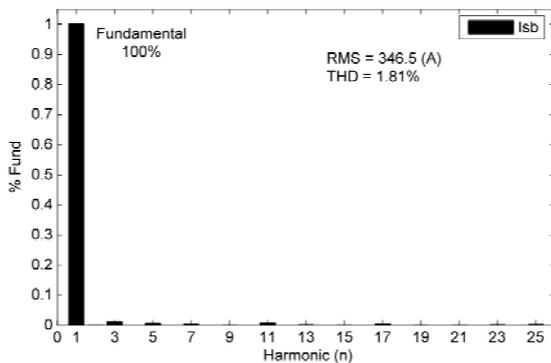
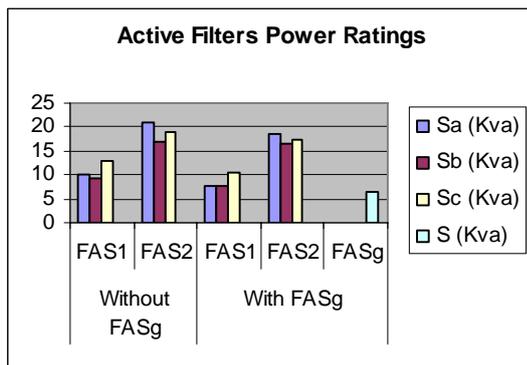


Fig. 4e: Espectro da Corrente da Fase B

VII. VALORES DE POTÊNCIA DO FILTRO ATIVO SÉRIE

A Tabela III mostra o consumo de potência dos filtros para as duas situações estudadas, ou seja, com e sem a presença do SAFg.

TABELA III
VALORES DE POTÊNCIA DO FILTRO



VIII. CONCLUSÃO

O filtro SAFg adicionado ao condutor neutro é altamente recomendável quando as SRF tradicionais são usadas como estratégia de controle para filtros ativos série de potência em sistemas trifásicos a quatro fios operando sob regime desequilibrado. A SRF não é capaz de detectar as componentes harmônicas de seqüência zero, o que não ocorre quando se utiliza o controlador MSRF.

A correção desta falha apresentada pelos controladores síncronos tradicionais, aqui realizada a partir da inserção do FASg torna possível a correção da THD das correntes da fonte para os níveis recomendados pela IEEE 519. Além disto, este procedimento minimiza a sobrecarga imposta aos filtros ativos SAF1, SAF2 e ao condutor neutro. Finalmente, a potência total requerida pelo sistema ativo é reduzida quando as componentes de seqüência zero são mitigadas pelo filtro SAFg.

IX. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] S. Bhattacharya, D.M. Divan e B. Banerjee, "Synchronous Frame Harmonic Isolator Using Active Series Filter" EPE Conf. Record, 1991, Vol. 3, pp. 30-35.
- [2] S. Bhattacharya e D.M. Divan "Synchronous Frame Based Controller Implementation for Hybrid Series Active Filter System" IEEE/IAS Conf. Record, 1995, pp. 2531-2540.
- [3] H. Akagi e H. Fujita, "A New Power Line Conditioner for Harmonic Compensation in Power Systems" IEEE Trans. Power Del., Vol. 10, No. 3, pp. 1570-1575, 1995.
- [4] S.D. Round e D.M.E. Ingram, "An Evaluation Of Techniques for Determining Active Filter Compensating Currents in Unbalanced Systems", Proc. European Conf. on Power Electronics and Applications, Trondheim, 1997, vol. 4, pp. 767-772.
- [5] M. T. Haque e S.H. Hosseini, "A Novel Control Strategy for Active Filters Usable in Harmonic Polluted and/or Imbalanced Utility Voltage Case of 3-Phase 4-Wire Distribution Systems" Proceedings of IEEE/ICHQP, pp 239-244, 2000.
- [6] T. Thomas, K. Haddad, G. Joós e A. Jaafari, "Performance Evaluation of Three Phase Three and Four Wire Active Filters" IEEE/IAS Conf. Record, pp 1016- 1023, 1996.
- [7] P.T. Cheng, Y.F. Huang, C.C. Hou, "Desing of a Neutral Harmonic Mitigator for Three-Phase Four-Wire Distribution System", IEEE/IAS, Annual Meeting, pp 164-171, 2001.
- [8] D.P. Manjure e E.B. Makram, "Impact of Unbalance on Power System Harmonics Proceedings of IEEE/ICHQP, pp 328-333, 2002.
- [9] P. Verdelho e G. Marques, "Design and Performance of an Active Power Filter and Unbalanced Current Compensator", IEEE Transactions on Ind. Applications, pp 422 - 427, 1994.
- [10] S. Bhattacharya, D.M. Divan, T.M. Frank e B. Banerje, "Active Filter System Implementation" IEEE Trans. Ind. Appl. Set/Oct 1998, pp 47-63.
- [11] F.Z. Peng e H. Akagi, "A New Approach to Harmonic Compensation in Power System - A combined of Shunt Passive and Series Active Filter", IEEE/IAS Annual Meeting, pp 874-880, 1988.
- [12] H. Fujita e H. Akagi, "A Practical Approach to Harmonic Compensation in Power System - Series Connection of Passive and Active Filter" IEEE/IAS Annual Meeting, pp 1107-1112, 1990.
- [13] S. Tnani, M. Mazaudier, A. Berthon e S. Diop, "Comparison Between Different Real-Time Harmonic Analysis Methods for Control of Electrical Machines" PEVD94, pp. 4946-4951.
- [14] P.C. Tan, D.G. Holmes e R.E. Morrison, "Control of Active Filter in 25 kV AC Traction System" AUPEC 2000, pp 63-68.
- [15] C.H. Silva, V.F. Silva e L.E. Borges da Silva, "Evaluation of Power-Ratings for Active Series Filter under Unbalanced Condition for a Three-Phase Four-Wire System", IEEE/PESC, Conf. Records, pp. 296-302, 2005.
- [16] C.H. Silva, V.F. Silva e L.E. Borges da Silva, "Active Series Filter Under Distorted and Unbalanced Operation Conditions: Problem or Solution", 8th Brazilian Power Electronics Conference, pp. 304-309, 2005.
- [17] C.H. Silva, V.F. Silva e L.E. Borges da Silva, "Synchronous Frame Based Controller Improvement for Active Series Filters under Unbalanced Conditions in Three Phase - Four Wire Systems", Anais da VII Conferência Internacional de Aplicações Industriais, Recife., 2006.