



GRUPO X

GRUPO DE ESTUDO DE SOBRETENSÕES, CORDENAÇÃO DE ISOLAMENTO E INTERFERÊNCIAS (GSI)

CONDICIONADORES HÍBRIDOS DE ENERGIA

Fausto Bastos Líbano*

Flávio Becon Lemos

Guilherme A. D. Dias

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL (PUCRS)

RESUMO

Neste trabalho apresentam-se aspectos gerais sobre a utilização de filtros híbridos de energia com parte ativa série para o condicionamento de grandes cargas não lineares conectadas aos sistemas de potência.

Descreve-se as principais configurações topológicas e suas características funcionais, obtêm-se equações importantes para projeto, simulações e resultados experimentais.

PALAVRAS-CHAVE

Filtro Ativo – Filtro Híbrido – Qualidade de Energia

1.0 – INTRODUÇÃO

Nos últimos anos a preocupação pela qualidade de fornecimento e consumo de energia elétrica tem aumentado de forma considerável, principalmente pela proliferação de cargas não lineares em todos os níveis dos sistemas de energia (doméstico, comercial e industrial). Estas cargas são importantes fontes geradoras da degradação da qualidade da energia utilizada, criando perturbações e/ou distorções na tensão e/ou corrente em função de seu intercâmbio de energia reativa com o sistema ser muito variável, com valores eficazes maiores que os valores médios. Ainda que estas cargas não lineares, tenham sua etapa de entrada, na maioria das vezes baseadas em conversores eletrônicos de potência, com as conseqüências citadas anteriormente, sob outro ponto de vista permitem que os equipamentos e processos no qual fazem parte sejam mais baratos, fáceis de controlar e em alguns aspectos mais eficientes.

Neste sentido os estudos sobre sistemas de filtragem de potência vêm buscando alternativas para atenuar estes problemas nas instalações e nos sistemas de energia. Principalmente na última década foram

propostas novas possibilidades topológicas de filtros de potência assim como diferentes estratégias de controle, devido a evolução da tecnologia eletrônica tanto em nível de semicondutores de potência como em nível de circuitos de controle. Também, vêm sendo realizadas atualizações periódicas nas normas relativas a distorções e perturbações, com regulações cada vez mais estritas.

A solução mais comum, ainda utilizada em algumas aplicações industriais para filtrar harmônicos de corrente e compensar a potência reativa na frequência fundamental, é a utilização de filtros passivos conectados em paralelo aos terminais das cargas não lineares. Um filtro passivo paralelo é basicamente constituído por um ou mais conjuntos de associações de componentes indutivos e capacitivos, de baixa resistência série, com o objetivo de reduzir perdas. Por outro lado, esta característica de baixo amortecimento pode dar lugar a ressonâncias entre as impedâncias do filtro e do sistema de alimentação provocando em algumas situações amplificação ao invés de atenuação das distorções.

A utilização de filtros ativos conectados em paralelo com o sistema de fornecimento de energia elétrica soluciona o problema das ressonâncias paralelo. Normalmente, estes filtros ativos são formados por inversores funcionando como fonte de corrente. Sua impedância de saída é alta diminuindo a possibilidade de ressonâncias entre filtro e linha nas frequências harmônicas características de ordem baixa. Entretanto, um filtro ativo paralelo tem problemas derivados de sua implementação prática, entre eles está a construção de um inversor de corrente modulado por largura de pulso, de grande capacidade, com bom comportamento dinâmico e poucas perdas. Outro é a necessidade de potência nominal de aproximadamente 30% em relação a potência da carga que se busca filtrar. Estas características fazem com que sua aplicação fique limitada a filtragem de cargas não lineares de baixa

potência (<100 kVA). Por outro lado, para algumas aplicações de baixa potência, o custo deste tipo de sistema de filtragem pode inclusive ser maior do que a própria carga, o que inviabiliza seu uso de forma extensiva.

Como uma alternativa as limitações dos filtros conectados em paralelo, passivos e ativos, e para potências médias e grandes (>100 kVA), foram propostos e vêm sendo pesquisados sistemas de filtragem híbrida. Estes sistemas são formados pela associação de filtros passivos e ativos, com o objetivo básico de melhorar as características de filtragem da parte passiva mediante uma parte ativa de pequena potência em relação a potência da carga. Neste trabalho estão apresentadas topologias, equações básicas, simulações e resultados experimentais.

2.0 - FILTROS HÍBRIDOS

Um filtro híbrido é formado por uma associação de filtros ativos e passivos, podendo ter diferentes configurações e funções de filtragem. Com estes busca-se compensar as limitações de ambos empregados por separado. Os filtros híbridos com parte ativa série atuando como impedância ativa tem sido bastante pesquisados, pois permitem modificar o comportamento harmônico do sistema com uma parte ativa de pequena potência. Com tal característica, os harmônicos da corrente de carga tem um caminho de menor impedância pelo filtro passivo. Possíveis harmônicas de tensão, previamente existentes no sistema, ficam isoladas da carga. Estas associações permitem melhorar as características de compensação dos filtros passivos, diminuindo fortemente as possibilidades de ressonâncias série ou paralela, devidas a fonte ou carga, respectivamente. Eles combinam a robustez dos filtros passivos com a eficiência dos filtros ativos melhorando a confiabilidade do sistema como um todo.

2.1 Filtro Híbrido Ativo Série (FHAS)

Esta associação é mostrada na Fig. 1. O objetivo principal desta combinação entre filtros ativo série e passivo paralelo é fazer com que o filtro ativo opere como um curto-circuito para correntes na frequência na fundamental e um circuito aberto para correntes harmônicas de baixa ordem. Nesta configuração, as harmônicas de corrente são forçadas a circularem através do filtro passivo paralelo, permitindo isolamento harmônico entre fonte e carga. Além disto, o filtro ativo série pode ser dimensionado somente para uma fração da potência de compensação, sendo o custo total do sistema é limitado.

2.2 Filtro Híbrido Ativo Paralelo (FHAP)

Esta associação é mostrada na Fig. 2. Nesta configuração, os filtros passivo e ativo estão conectados em série e ambos em paralelo com a linha de potência. Como o filtro passivo opera como impedância ativa, e numa situação ideal de controle como uma resistência ativa, isto permite que o filtro ativo regule a quantidade de harmônicos fluindo pelo filtro passivo atuando no seu fator de qualidade. A corrente circulando através do filtro ativo é a mesma que do filtro passivo, i.e., correntes harmônicas mais corrente reativa na frequência fundamental, dependendo do projeto do filtro passivo. O filtro ativo série também pode ser associado para proporcionar sintonia a filtros passivos previamente instalados fora de sintonia.

3.0 – ANÁLISE QUANTITATIVA

A combinação de um filtro ativo série mais um ou vários filtros passivos paralelos é analisada em função do circuito equivalente monofásico representado na figura 3. Analisando este circuito com base no Teorema de Superposição, pode-se separar a contribuição harmônica de cada fonte de energia nas principais variáveis do circuito. Para o caso da fonte de corrente harmônica da carga, que teoricamente é a principal fonte geradora de harmônicas de corrente, obtêm-se o primeiro termo do segundo membro das equações (1), (2) e (3), sendo a contribuição harmônica da fonte de tensão considerada no segundo termo do segundo membro das respectivas equações.

Na análise assume-se que o filtro ativo série é constituído por um inversor operando com fonte de tensão controlada em corrente com grande largura de banda, comportando-se como uma fonte de tensão controlada ideal, v_{FA} . A carga não linear (por exemplo um retificador de potência) é representada por uma fonte de corrente, i_C , devido a presença de uma grande indutância em seu lado de CC. A impedância equivalente dos filtros passivos paralelo é Z_f e a impedância equivalente da fonte é Z_S .

Esta forma de filtragem difere dos sistemas de filtragem ativa série ou filtragem ativa paralelo convencionais, porque nestas os filtros são controlados para atuar como fonte de tensão (idealmente impedância série interna pequena) ou fonte de corrente (idealmente impedância paralela interna grande) respectivamente. Nos filtros híbrido com parte ativa série o comportamento de impedância ativa pode ser obtido acrescentando a linha uma tensão harmônica proporcional aos harmônicos de corrente que circulam por ela. O filtro ativo tem a função de isolamento harmônico entre a fonte e a carga e os filtros passivos tem a função de compensação harmônica, também podendo ter a função de compensador do fator de deslocamento.

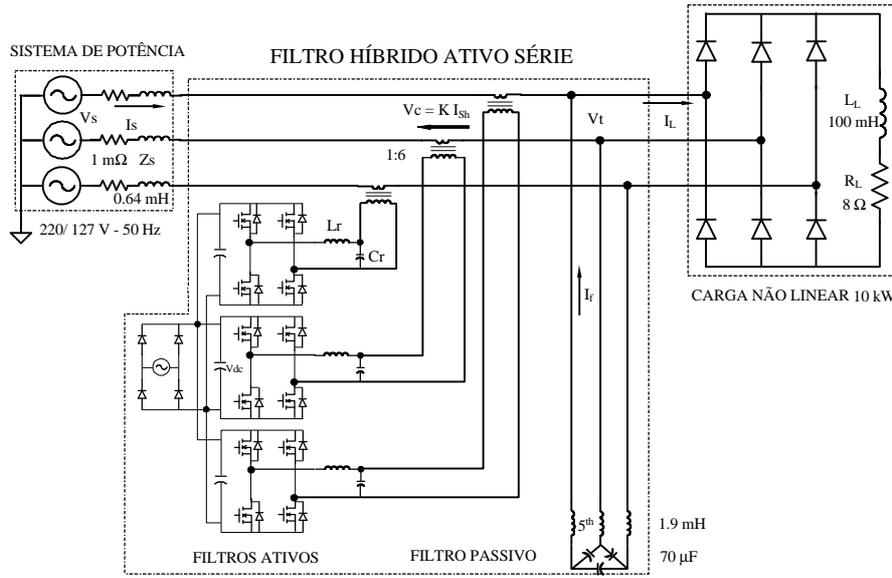


FIGURA 1 - Filtro híbrido ativo série.

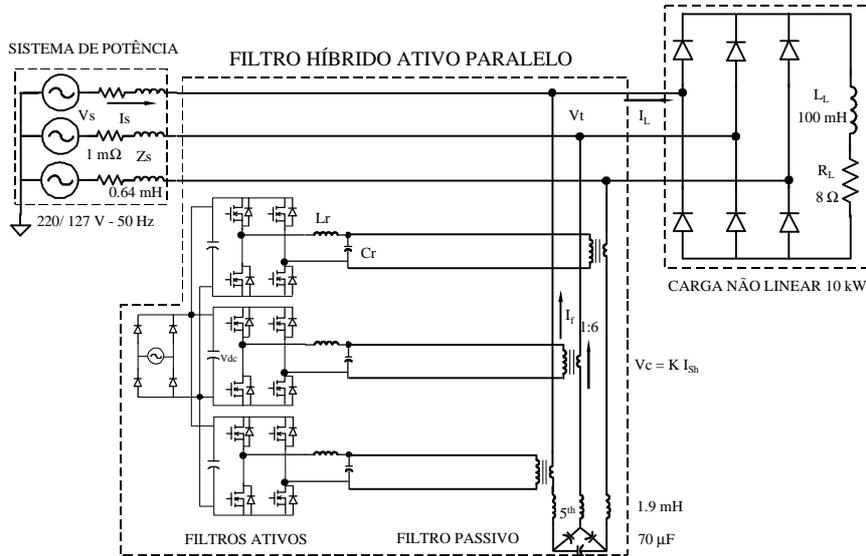


FIGURA 2 - Filtro híbrido ativo paralelo.

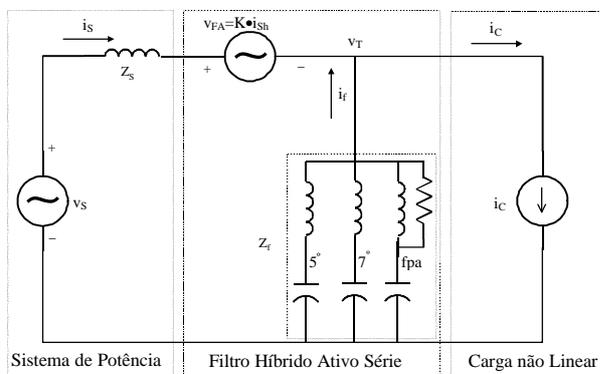


FIGURA 3 - Circuito equivalente monofásico de um FHAS.

$$I_{Sh} = \left(\frac{Z_f}{K + Z_s + Z_f} \right) \cdot I_{Ch} + \left(\frac{1}{K + Z_s + Z_f} \right) \cdot V_{Sh} \quad (1)$$

$$V_{Th} = - \left(\frac{(Z_s + K) Z_f}{K + Z_s + Z_f} \right) \cdot I_{Ch} + \left(\frac{Z_f}{K + Z_s + Z_f} \right) \cdot V_{Sh} \quad (2)$$

$$V_{FA} = \left(\frac{K \cdot Z_f}{K + Z_s + Z_f} \right) \cdot I_{Ch} + \left(\frac{K}{K + Z_s + Z_f} \right) \cdot V_{Sh} \quad (3)$$

A partir das equações (1), (2) e (3) verifica-se que se o filtro ativo série é controlado tal que $K \gg \frac{1}{2} Z_f$ as harmônicas da corrente de carga se vem forçadas a fluir para o filtro passivo paralelo em vez de circular pela fonte. Também verifica-se que se o filtro série

pode ser controlado tal que a resistência K seja muito maior que a impedância da fonte, $\frac{1}{2}Z_s \frac{1}{2}$ e a impedância da fonte não terão efeito nas características de compensação do filtro passivo paralelo. Também, as harmônicas do entorno previamente existentes no sistema não poderão fluir para o filtro passivo paralelo, diminuindo fortemente as possibilidades de condições ressonantes entre fonte e filtro passivo paralelo. De forma equivalente, como as harmônicas da corrente de carga não podem fluir para a fonte ou para outros filtros passivos do sistema, a possibilidade de condições ressonantes entre carga e fonte também reduz-se drasticamente. O filtro ativo série atua de forma equivalente a uma resistência de amortecimento para as harmônicas, ajudando na solução de problemas do uso de filtros passivos paralelo empregados sozinhos, tais como ressonâncias paralelo e drenagem de harmônicas da rede.

As equações também indicam que se o filtro ativo série pode ser controlado tal que $K \gg \frac{1}{2}Z_s \frac{1}{2}$ e $K \gg \frac{1}{2}Z_f \frac{1}{2}$ então as tensões harmônicas da fonte V_{Sh} são aplicadas somente sobre o filtro ativo série, não aparecendo na tensão terminal do filtro passivo paralelo V_{Th} . Neste caso, as tensões harmônicas aplicadas sobre o filtro ativo série são dadas pelo somatório de tensões harmônicas geradas pelas harmônicas da corrente de carga fluindo na impedância do filtro passivo Z_f , $Z_f \cdot I_{Ch}$, mais as tensões harmônicas da fonte. Considerando K idealmente infinito pode-se obter as seguintes equações

$$I_{Sh} = 0 \quad (4)$$

$$V_{Th} = -Z_f \cdot I_{Ch} \quad (5)$$

$$V_{FA} = Z_f \cdot I_{Ch} + V_{Sh} \quad (6)$$

O primeiro termo no lado direito da equação (6) está relacionado com a impedância do filtro passivo paralelo e depende de seu fator de qualidade Q . Um alto valor de fator de qualidade Q , produz um pequeno requisito de VA nominais para o filtro ativo série. O segundo termo do lado direito da equação (6) depende das harmônicas de tensão da fonte V_{Sh} , os quais não aparecem nos terminais do filtro passivo paralelo mas sobre o filtro ativo série. Assim, o filtro ativo série isola as harmônicas da corrente da carga do sistema de potência e vice-versa. Devido a ação de isolamento harmônica do filtro ativo série, o filtro passivo paralelo pode ser projetado independentemente da impedância da fonte. Esta estrutura é uma alternativa interessante para aplicações onde já existam sistemas de filtragem passiva, uma vez que é possível instalar um filtro ativo série no sistema de potência com carga produtora de harmônicas e com filtros passivos paralelo ou capacitores corretores do fator de deslocamento já em operação, com o objetivo de melhorar suas características de filtragem. Também esta estrutura pode ser aplicada a múltiplas cargas produtoras de harmônicas conectadas a um mesmo barramento.

Dessa forma a corrente circulando pelo filtro ativo resulta ser somente a fundamental da carga, ou seja I_{Cf} . O cálculo da potência aparente nominal do filtro ativo série, considerando um sistema trifásico equilibrado, pode ser quantificado pela equação (7)

$$S_{FA} = 3 \cdot |V_{FA}| \cdot |I_{Cf}| = 3 \cdot |V_{Sh} + Z_f \cdot I_{Ch}| \cdot |I_{Cf}| \quad (7)$$

Escrevendo a equação anterior sob a forma de somatório obtêm-se

$$S_{FA} = 3 \cdot \left| \sqrt{\left(\sum_h^n V_{Sh_{total}}^2 \right)} + \sqrt{\left(\sum_h^n Z_{fh} \cdot I_{Ch}^2 \right)} \right| \cdot |I_{Cf}| \quad (8)$$

Na prática um valor de K grande pode exigir uma quantidade de VA nominais do filtro ativo série (equação 3 - V_{FA}) que se oponha a sua concepção inicial de ser um filtro ativo de baixa potência. Também um valor de K elevado exige que o filtro ativo série tenha que gerar picos de tensão elevados em curtos intervalos de tempo, o que é difícil de implementar na prática, principalmente em inversores de grande potência. Desta forma, existe um compromisso entre a potência do filtro ativo série, sua faixa de resposta em frequência e as características de filtragem na otimização do projeto do sistema de filtragem como um todo.

3.1 Análise em Frequência

Com base nas principais equações do sistema podem ser realizadas análises do comportamento de suas principais variáveis. Por exemplo, a corrente da fonte em função da corrente de carga e da tensão da fonte.

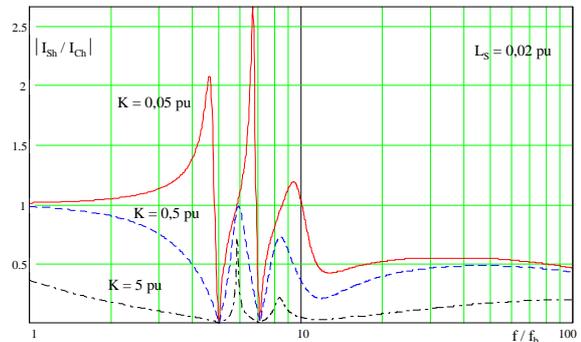


Figura 4 - Resposta em frequência de I_{Sh} / I_{Ch} .

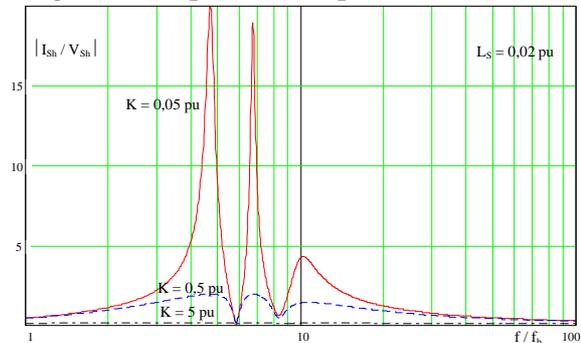


Figura 5 - Resposta em frequência de I_{Sh} / V_{Sh} .

4.0 – SIMULAÇÕES

O comportamento em regime permanente e transitório do circuito de controle proposto e das estruturas de potência híbrida série e híbrida paralela foram verificadas por simulação computacional. Os circuitos de potência e suas respectivas constantes usadas nas simulações do controle de filtragem direta das correntes da fonte estão quantificadas nas Figs. 1 e 2. Em todas simulações foi considerado que a fonte de tensão não contém harmônicas e que o ganho K do filtro ativo é 2.

Nas figuras 6 e 7 estão representadas formas de onda de simulações em regime permanente para um **FHAS** associado a um retificador não controlado (10 kW - 290 Vcc) com filtragem indutiva e filtragem indutiva mais capacitiva no lado de corrente contínua respectivamente.

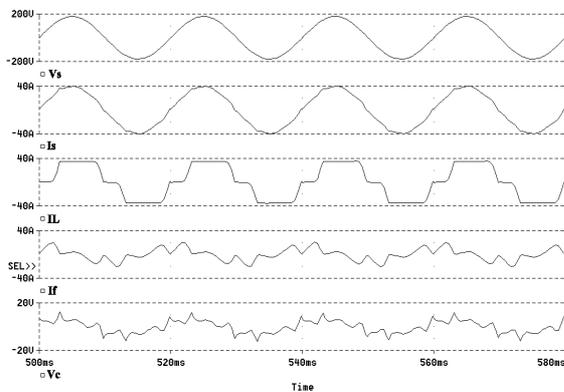


FIGURA 6 - Formas de onda de FHAS em um ret. não controlado com filtro L no lado de CC.

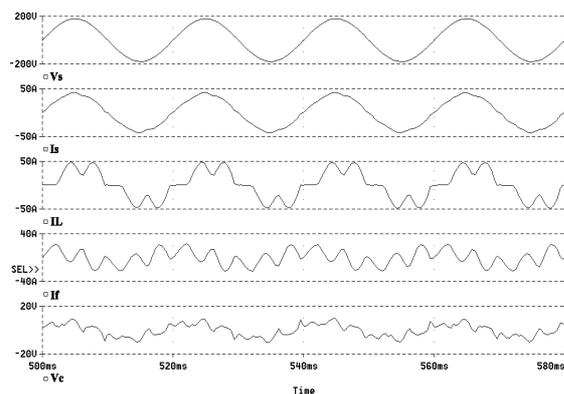


FIGURA 7 - Formas de onda de FHAS em um retificador não controlado com filtro LC no lado de CC.

Nos dois casos foi possível dar formato muito próximo ao de uma onda senoidal para as ondas de corrente da fonte, embora ainda exista um pequeno nível de distorção harmônica nas mesmas. Também se pode verificar que o nível de tensão gerenciado pela parte ativa dos sistemas de filtragem é reduzido e que quantificando a potência gerenciada por esta se

encontram valores menores que 4% em relação a potência da carga.

Um detalhe das formas de onda de corrente de fonte e de carga do **FHAS** com seus respectivos espectros harmônicos, geradas nas mesmas condições que as apresentadas nas figuras 6 e 7, estão representadas nas figuras 8 e 9.

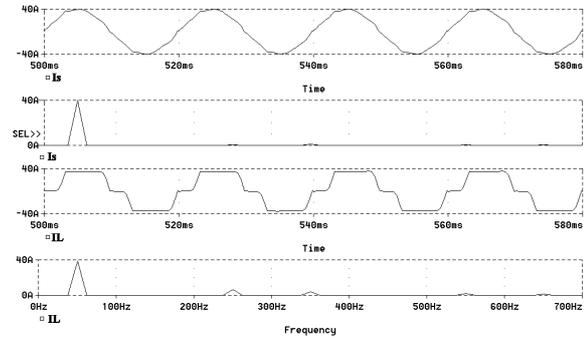


FIGURA 8 - Formas de onda de I_s e I_L e espectro para um retificador não cont. com filtro L no lado de CC, considerando um FHAS.

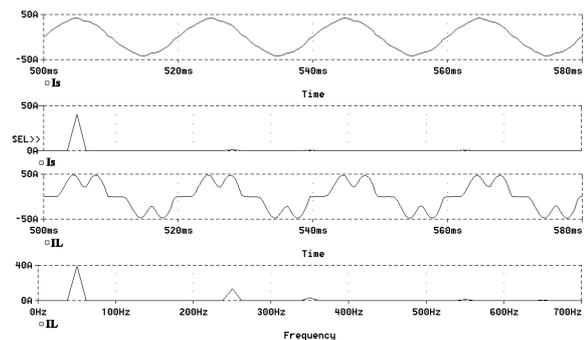


FIGURA 9 - Formas de onda de I_s e I_L e espectro para um retificador não cont. com filtro LC no lado de CC, considerando um FHAS.

O comportamento transitório do **FHAS** associado a um retificador não controlado com filtragem indutiva em seu lado de corrente contínua está mostrado nas figuras 10 e 11, para os casos de degrau de 50% no módulo da corrente de carga, positivo e negativo respectivamente. A partir das figuras 10 e 11 é possível verificar que com uma estratégia de controle adequada é possível obter a estabilização do sistema após três períodos, considerando a frequência fundamental do sistema. Em outras simulações de comportamento transitório, com diferente filtragem no lado de CC do retificador não controlado, e para o **FHAP**, também foi possível conseguir operação estável aproximadamente no mesmo intervalo de tempo.

5.0 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS

O comportamento prático de um **FHAS**, está mostrado em dois conjuntos de formas de onda. No primeiro representa-se comportamento da filtragem em

nível de controle, mostrando-se a corrente da fonte, harmônicas e resultante em diferentes situações: para um retificador não controlado com filtro L em seu lado de CC, figura 11, para um retificador controlado com ângulo de disparo de aproximadamente 45° com filtro L em seu lado de CC 12.

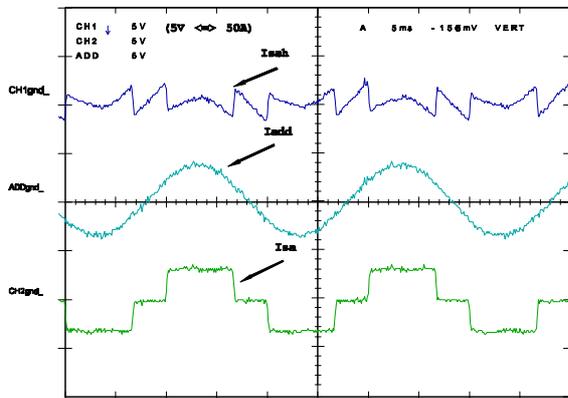


FIGURA 11 - I_{Sah}^* , I_{add} , I_{sa} , retificador não controlado.

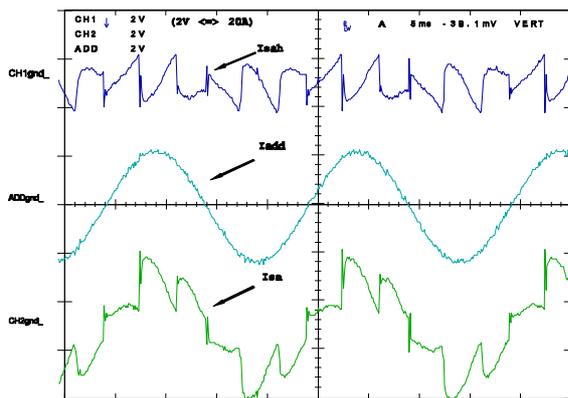


FIGURA 12 - I_{Sah}^* , I_{add} , I_{sa} , retificador controlado.

Em todos os casos foi possível detectar as harmônicas de corrente da fonte com um bom nível de precisão o que caracteriza a validade da estratégia de controle.

O segundo conjunto de formas de onda representa o comportamento do *FHAS* em nível de potência, considerando como carga não linear um retificador não controlado, trifásico em ponte, de 10 kW e 290 V. A figura 13 mostra a corrente de carga (I_{La}) e a corrente da fonte (I_{Sa}) quando somente o filtro passivo esta sendo utilizado como elemento de filtragem. A figura 14 mostra o comportamento da tensão da fonte (V_{Sa}) e da corrente da fonte (I_{Sa}) quando filtros ativo e passivo estão em operação. Nesta figura é possível verificar que há uma aproximação da forma de onda da corrente da fonte à uma forma de onda senoidal, porem ainda existe um pouco de distorção harmônica nesta forma de onda, principalmente devido a não idealidade dos inversores que configuram a parte ativa do sistema, as quais não conseguem reproduzir com precisão as

tensões harmônicas de referência geradas pelo controle.

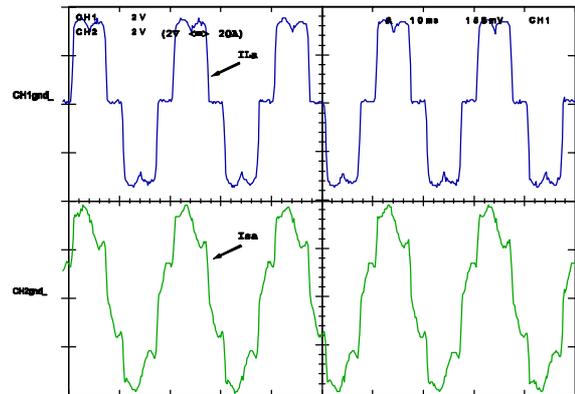


FIGURA 13 - I_{La} e I_{Sa} para carga somente com filtro passivo.

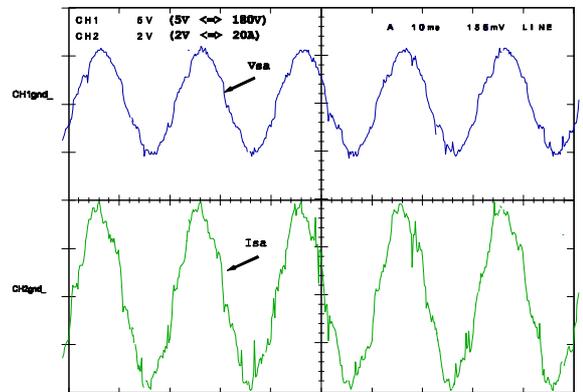


FIGURA 14 - V_{Sa} e I_{Sa} para carga com filtros ativo e passivo.

6.0 - CONCLUSÕES

Este artigo descreve configurações topológicas de filtros híbridos de potência com parte ativa série. Com uma estratégia de controle adequada este sistema apresenta como vantagens sobre outras estruturas de filtragem sua simplicidade e o baixo custo. Com ela foi possível obter um comportamento aceitável na filtragem de cargas não lineares de potência. Considerando a carga não linear com etapa de entrada composta por retificador trifásico não controlado de diodos, é possível atender as recomendações de correntes harmônicas da norma IEEE - 519. Com base nas simulações e nos resultados experimentais pode-se verificar que resultados promissores foram obtidos.

7.0 - BIBLIOGRAFIA

- (1) Líbano, F. B., Simonetti, D. S. L. e Uceda, J. Frequency-domain analysis of hybrid filter systems, *Proc. of IEEE/PESC*, Vol.2 ,pp.1142-1148, 1996.
- (2) Líbano, F. B., Cobos, J. A. e Uceda, J. Simplified Control Strategy for Hybrid Active Filters, *Proceedings of IEEE/PESC*, Vol. 2, pp. 1102-1108, 1997.