



**XXIII SNTPEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

FI/GDS/05
18 a 21 de Outubro de 2015
Foz do Iguaçu - PR

GRUPO – X

GRUPO DE ESTUDO DE DESEMPENHO DE SISTEMAS ELÉTRICOS – GDS

**METODOLOGIA PARA REDUÇÃO DE TENSÕES HARMÔNICAS EM REDES ELÉTRICAS
UTILIZANDO FILTROS ATIVOS NA MÉDIA TENSÃO**

Franklin Clement Veliz(*)
CEPEL

Sergio Luis Varricchio
CEPEL

Cristiano de Oliveira Costa
CEPEL

Octávio Augusto da Cunha
POWER SOLUTION

Renato Campos Amaral
ENERWATT

RESUMO

Frequentemente os estudos de desempenho harmônico realizados pelos novos acessantes ao SIN (Sistema Interligado Nacional), cujas cargas sejam predominantemente não lineares, apontam a necessidade de medidas corretivas para atenuar as distorções de tensão no PAC (Ponto de Acoplamento Comum) a valores dentro dos limites especificados nos Procedimentos de Rede do ONS. Entre as medidas corretivas praticadas no setor elétrico, tem-se a inserção de filtros passivos na média tensão. Via de regra, a utilização desta medida corretiva recomenda filtros de baixa ordem harmônica de altas potências, elevando significativamente os custos dos empreendimentos.

De maneira a superar este inconveniente e atender os Procedimentos de Rede do ONS, neste trabalho é proposta uma nova abordagem de atenuação de distorções harmônicas de tensão no PAC utilizando filtros ativos na média tensão. A metodologia proposta, baseada numa solução analítica que contempla as correntes harmônicas produzidas tanto pelas instalações do novo acessante quanto pelo SIN, permitirá usufruir das inúmeras vantagens relacionadas a utilização de filtros ativos.

A validade da metodologia proposta e a contundente superioridade dos filtros ativos perante os filtros passivos são verificadas em um exemplo real mostrado neste trabalho.

PALAVRAS-CHAVE

Harmônicos, procedimentos de rede, rede básica, método dos lugares geométricos, filtros passivos, filtros ativos, média tensão.

1.0 - INTRODUÇÃO

Os novos acessantes à Rede Básica do SIN, que possuam cargas não lineares significativas, deverão realizar estudos de desempenho harmônico no PAC utilizando o Método dos Lugares Geométricos (MLG) [1], [2] recomendado pelo ONS através de seus Procedimentos de Rede [1]. Tal método corresponde a uma avaliação razoavelmente conservadora do impacto individual provocado pela rede do novo acessante, onde a mesma é representada por um equivalente de Norton e a Rede Básica do SIN por um lugar geométrico (LG) de admitâncias.

Este método é bastante abrangente e permite considerar diversas situações de rede tais como diferentes anos, patamares de carga e situações de contingência (perda de linhas de transmissão, transformadores, bancos de capacitores, etc.). Também leva em consideração as possíveis alterações ou mudanças das admitâncias devidas à imprecisão de modelagens dos elementos que compõem o sistema. Entende-se que com estas considerações consiga-se retratar a variação da admitância vista do PAC durante grande parte da vida útil da instalação.

Uma consequência do conservadorismo do MLG, geralmente observada nos estudos de desempenho harmônico, é a violação dos limites especificados nos Procedimentos de Rede do ONS para baixas frequências (2º até 11º harmônico). Para que o parecer de acesso ao SIN seja favorável, é imprescindível o atendimento destes limites. Desta forma, os novos acessantes deverão mitigar as ultrapassagens verificadas através de medidas

* CEPEL - Av. Horácio Macedo 354, Cidade Universitária - CEP: 21941-911 - Rio de Janeiro, RJ.
Tel: +55-21-2598-6214, Fax: +55-21-2598-6451, email: franklincv@cepel.br

corretivas, como, por exemplo, a utilização de filtros passivos na média tensão. Frequentemente a potência destes filtros é elevada, tornando esta alternativa de atenuação uma opção dispendiosa.

Os custos elevados destes filtros, associados ao conservadorismo da metodologia do Lugar Geométrico (que não considera a natureza probabilística dos eventos de contingência na Rede Básica) utilizada para o projeto dos mesmos, apontam para a necessidade de uma nova opção de filtragem das correntes harmônicas presentes nas instalações dos novos acessantes.

Desta maneira, objetivando superar estes inconvenientes e atender os Procedimentos de Rede do ONS, neste trabalho é proposta uma nova abordagem de atenuação de distorções harmônicas de tensão no PAC utilizando filtros ativos na média tensão.

A metodologia proposta, baseada numa solução analítica que contempla as correntes harmônicas produzidas tanto pelas instalações do novo acessante quanto pelo SIN, permitirá usufruir das diversas vantagens relacionadas à utilização de filtros ativos. Como exemplos destas vantagens, pode-se citar a flexibilidade na filtragem, o isolamento de grande parte da rede do novo acessante perante o SIN, a filtragem dos harmônicos e inter-harmônicos de relevância na faixa de frequência de interesse, a impossibilidade de geração de ressonâncias paralelas, a reduzida potência requerida por estes equipamentos para atender os limites dos Procedimentos de Rede, etc.

Implementou-se a metodologia proposta no Matlab que, utilizada juntamente com o programa HarmZs do CEPEL [3], possibilitou a obtenção dos resultados das análises de um caso real utilizado como exemplo.

Desta forma, além da metodologia proposta, neste trabalho é apresentado um caso real que evidencia as vantagens do uso de filtros ativos em relação aos filtros passivos.

2.1 Metodologia Convencional

A solução tradicionalmente utilizada para amortecer as distorções de tensão no PAC, consiste em utilizar filtros passivos de sintonia simples ou amortecidos (passa alta) na média tensão. A utilização destes filtros é devida à simplicidade, robustez, confiabilidade, baixa manutenção e fácil obtenção de seus parâmetros. Um sistema típico com esta alternativa de filtragem pode ser representado pelo equivalente mostrado na Figura 1, onde V_C é a tensão da barra coletora de média tensão onde o filtro foi instalado, I_N é a corrente equivalente vista desta barra coletora (corrente de Norton), Z_N é a impedância equivalente vista da mesma barra (impedância de Norton), Z_{TR} é a impedância do transformador elevador, V_S é a tensão do barramento de alta do transformador da subestação da rede do acessante, Y_{LT} é a metade da admitância capacitiva da linha de transmissão principal, Z_{LT} é a impedância série da mesma linha de transmissão, V_{PAC} é a tensão do PAC e Z_{LG} é a impedância do SIN representada pelo seu LG.

Esta solução é baseada na análise de tentativa e erro dos cálculos dos parâmetros dos filtros até que os limites especificados pelo ONS sejam atendidos, considerando suas máximas dissintonias possíveis produzidas pelas tolerâncias de fabricação, variação da temperatura, falhas de componentes, variação da frequência do sistema, etc.

Apesar da diversidade entre os tipos de equipamentos com comportamento não linear, característicos de cada empreendedor, como por exemplo conversores eletrônicos em centrais de geração eólica, fornos a arco em siderúrgicas, máquinas de solda em estaleiros, etc. é comum encontrar circulando nas instalações destes empreendedores correntes harmônicas de baixa ordem (2^o até 11^o harmônica) injetadas por estes equipamentos.

Considerando que a potência de um filtro passivo é aproximadamente inversamente proporcional à sua frequência de sintonia, este tipo de solução pode ser uma alternativa que, além de custosa, seja inviável tecnicamente.

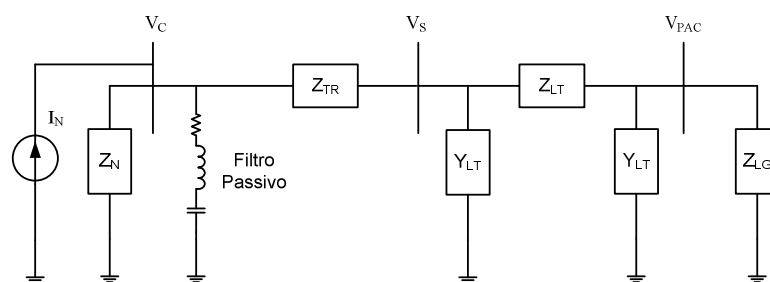


Figura 1: Circuito equivalente contendo uma carga não linear e compensado por um filtro passivo

1.1 Metodologia Proposta

Filtros ativos na média tensão estão sendo amplamente utilizados em sistemas industriais para a atenuação de distorções harmônicas de tensão e corrente.

O principal problema da utilização de filtros ativos na média tensão pelos novos acessantes ao SIN, consiste na inexistência de uma metodologia que comprove sua eficácia de modo a atender os Procedimentos de Rede do ONS. Para superar este problema, neste trabalho é proposta uma nova metodologia cuja formulação é analítica e é baseada no princípio de funcionamento de um filtro ativo ideal.

1.1.1 Princípio de funcionamento de um filtro ativo ideal:

Na Figura 2 é apresentado o circuito equivalente de um sistema elétrico contendo uma carga não linear sujeito à redução do conteúdo harmônico de correntes através de um filtro ativo.

Um filtro ativo é considerado ideal quando compensa em sua totalidade as correntes harmônicas produzidas pela carga não linear do sistema ($I_F = -I_N$). Esta compensação total anula as correntes no transformador associado ao filtro projetado ($I_{CS} = 0$), zerando a diferença de potencial entre as barras do transformador ($V_C = V_S$).

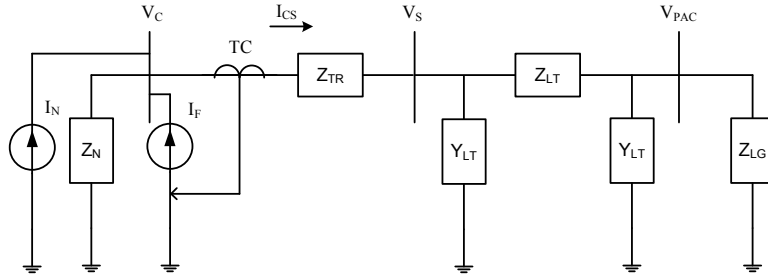


Figura 2: Circuito equivalente contendo uma carga não linear e compensado por um filtro ativo ideal

Observa-se que o circuito da Figura 2 emula um complexo eólico ligado ao SIN, onde V_C é a tensão da barra coletora de média tensão que abrange o parque eólico composto pelos seus aerogeradores interligados por cabos subterrâneos e/ou linhas de transmissão aéreas, I_N corresponde à corrente de Norton desta barra devida aos conversores dos aerogeradores e linhas de transmissão, Z_N é a impedância de Norton do parque eólico vista da mesma barra, Z_{TR} corresponde à impedância do transformador de acoplamento da média para alta tensão (transformador coletor) e V_S , Y_{LT} , Z_{LT} , V_{PAC} e Z_{LG} possuem as mesmas descrições indicadas para o circuito equivalente da Figura 1.

O princípio de funcionamento do filtro ativo ideal, isto é, $I_{CS} = 0$ e, conseqüentemente, $V_C = V_S$, é mantido quando existem correntes harmônicas vindas de ambos os terminais do transformador coletor, conforme mostrado na Figura 3, uma vez que o filtro ativo possui um controle em malha fechada que objetiva zerar o erro de corrente neste transformador, isolando os sistemas vistos pelos seus barramentos.

Nesta situação, V_{GLOBAL} corresponde à tensão do limite global inferior especificada pelo ONS [1] e I_{SIN} é a corrente proveniente do SIN produzida por esta tensão.

Para o cálculo da corrente total gerada pelo filtro ativo ideal nesta situação, utiliza-se o princípio de superposição.

A corrente do filtro devida à corrente equivalente injetada no barramento coletor do acessante é dada em (1):

$$I_{FC} = -I_N \quad (1)$$

e a corrente do filtro devida à corrente proveniente do SIN é dada em (2) (lembrando que $I_{CS} = 0$ e $V_C = V_S$):

$$I_{FS} = \frac{V_S}{Z_N} \quad (2)$$

De modo a ser conservativo, o valor de V_S tem que ser o máximo possível. Para tal propósito, deve ser avaliado o conjunto composto pelo elevado número de impedâncias que definem o contorno do LG.

Desta maneira, a corrente total no filtro é dada pela soma destas correntes, conforme mostrado em (3):

$$I_F = I_{FC} + I_{FS} \quad (3)$$

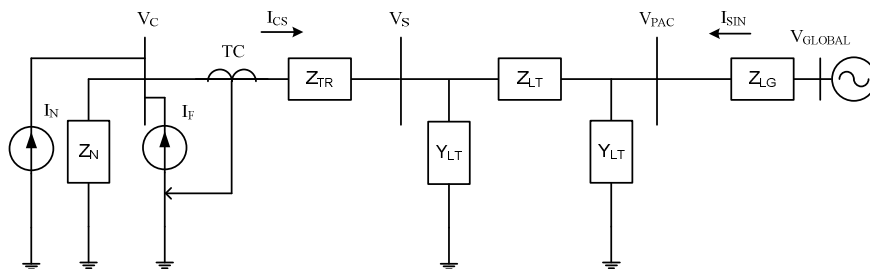


Figura 3: Circuito equivalente com um filtro ativo e com fontes harmônicas nas redes do acessante e do SIN

O isolamento entre os subsistemas produzido pelo filtro ativo ideal, pode ser generalizado quando existem vários filtros ativos atuando simultaneamente, conforme mostrado na Figura 4, pois as correntes geradas por estes filtros devem zerar as correntes nos respectivos transformadores coletores ($I_{C1S1} = I_{C2S2} = I_{C3S3} = 0$) e igualar as tensões nos barramentos dos mesmos ($V_{C1} = V_{S1}$, $V_{C2} = V_{S2}$, e $V_{C3} = V_{S3}$). Por estes mesmos motivos, não haverá conflito

entre os controles dos mesmos. Isto significa que o comportamento de cada filtro ativo pode ser avaliado independentemente da atuação dos outros filtros.

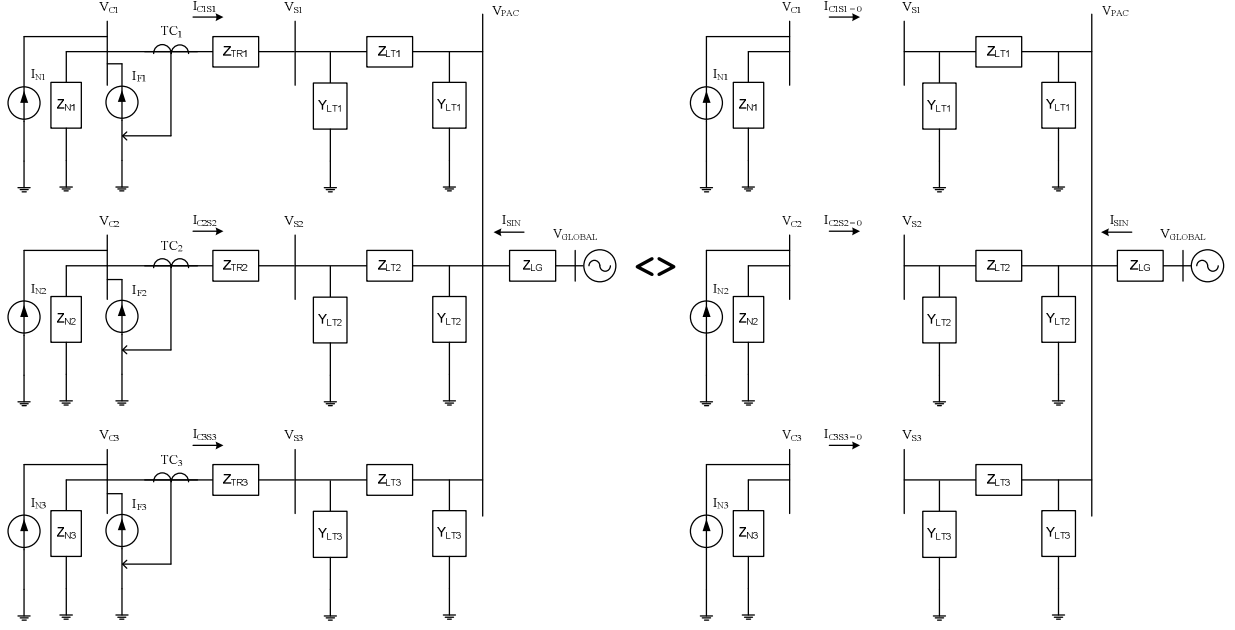


Figura 4: Circuito equivalente com várias fontes harmônicas e filtros ativos atuando simultaneamente

1.1.2 Metodologia Analítica Proposta:

De modo a generalizar e comprovar os conceitos básicos descritos, este trabalho propõe uma solução analítica para o cálculo das correntes geradas pelos filtros ativos ideais, conforme explicada a seguir.

Para um sistema elétrico genérico de 'n' barras, com 'm' barras com fontes de corrente na baixa tensão ($1 \dots m$) e 'k' barras com filtros ativos na média tensão ($m+1 \dots m+k$), a modelagem do mesmo é dado pelo sistema de equações mostrados em (4) e (5):

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ \vdots \\ V_m \\ V_{m+1} \\ \vdots \\ V_{m+k} \\ V_{m+k+1} \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{1,1} & \dots & Z_{1,m} & Z_{1,m+1} & \dots & Z_{1,m+k} & Z_{1,m+k+1} & \dots & Z_{1,n} \\ \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ Z_{m,1} & \dots & Z_{m,m} & Z_{m,m+1} & \dots & Z_{m,m+k} & Z_{m,m+k+1} & \dots & Z_{m,n} \\ Z_{m+1,1} & \dots & Z_{m+1,m} & Z_{m+1,m+1} & \dots & Z_{m+1,m+k} & Z_{m+1,m+k+1} & \dots & Z_{m+1,n} \\ \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ Z_{m+k,1} & \dots & Z_{m+k,m} & Z_{m+k,m+1} & \dots & Z_{m+k,m+k} & Z_{m+k,m+k+1} & \dots & Z_{m+k,n} \\ Z_{m+k+1,1} & \dots & Z_{m+k+1,m} & Z_{m+k+1,m+1} & \dots & Z_{m+k+1,m+k} & Z_{m+k+1,m+k+1} & \dots & Z_{m+k+1,n} \\ \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ Z_{n,1} & \dots & Z_{n,m} & Z_{n,m+1} & \dots & Z_{n,m+k} & Z_{n,m+k+1} & \dots & Z_{n,n} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I_1 \\ \vdots \\ I_m \\ I_{m+1} \\ \vdots \\ I_{m+k} \\ I_{m+k+1} \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$V_{m+1} = V_{m+k+1} \quad V_{m+2} = V_{m+k+2} \quad \dots \quad V_{m+k} = V_{m+2k} \quad (5)$$

Selecionando as equações de interesse do sistema dado em (4), isto é, as equações que lidam com as tensões dos barramentos terminais de cada transformador coletor, obtém-se:

$$\begin{bmatrix} V_{m+1} \\ \vdots \\ V_{m+k} \\ V_{m+k+1} \\ \vdots \\ V_{m+2k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{m+1,1} & \dots & Z_{m+1,m} & Z_{m+1,m+1} & \dots & Z_{m+1,m+k} & Z_{m+1,m+k+1} & \dots & Z_{m+1,m+2k} \\ \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ Z_{m+k,1} & \dots & Z_{m+k,m} & Z_{m+k,m+1} & \dots & Z_{m+k,m+k} & Z_{m+k,m+k+1} & \dots & Z_{m+k,m+2k} \\ Z_{m+k+1,1} & \dots & Z_{m+k+1,m} & Z_{m+k+1,m+1} & \dots & Z_{m+k+1,m+k} & Z_{m+k+1,m+k+1} & \dots & Z_{m+k+1,m+2k} \\ \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ Z_{m+2k,1} & \dots & Z_{m+2k,m} & Z_{m+2k,m+1} & \dots & Z_{m+2k,m+k} & Z_{m+2k,m+k+1} & \dots & Z_{m+2k,m+2k} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I_1 \\ \vdots \\ I_m \\ I_{m+1} \\ \vdots \\ I_{m+k} \\ I_{m+k+1} \\ \vdots \\ I_{m+2k} \end{bmatrix} \quad (6)$$

Resolvendo as equações (5) e (6), para o conjunto formado pelas correntes dos filtros ativos, obtém-se:

$$\begin{bmatrix} \{z_{(m+k+1, :)} - z_{(m+1, :)}\} \times \mathbf{I}_{orig} \\ \vdots \\ \{z_{(m+2k, :)} - z_{(m+k, :)}\} \times \mathbf{I}_{orig} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \{z_{m+1,m+1} - z_{m+k+1,m+1}\} & \cdots & \{z_{m+1,m+k} - z_{m+k+1,m+k}\} \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ \{z_{m+k,m+1} - z_{m+2k,m+1}\} & \cdots & \{z_{m+k,m+k} - z_{m+2k,m+k}\} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{m+1} \\ \vdots \\ \mathbf{I}_{m+k} \end{bmatrix} \quad (7)$$

Onde \mathbf{I}_{orig} corresponde ao vetor cujas componentes são as fontes de corrente presentes no sistema elétrico sem considerar as fontes de corrente que representam os filtros ativos. O símbolo ':' nos vetores impedância denotam todas as colunas da respectiva linha da matriz de impedâncias em análise.

Resolvendo o sistema linear dado em (7), obtém-se as correntes resultantes nos filtros ativos ideais:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}_{m+1} \\ \vdots \\ \mathbf{I}_{m+k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \{z_{m+1,m+1} - z_{m+k+1,m+1}\} & \cdots & \{z_{m+1,m+k} - z_{m+k+1,m+k}\} \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ \{z_{m+k,m+1} - z_{m+2k,m+1}\} & \cdots & \{z_{m+k,m+k} - z_{m+2k,m+k}\} \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} \{z_{(m+k+1, :)} - z_{(m+1, :)}\} \times \mathbf{I}_{orig} \\ \vdots \\ \{z_{(m+2k, :)} - z_{(m+k, :)}\} \times \mathbf{I}_{orig} \end{bmatrix} \quad (8)$$

Observa-se que cada uma destas correntes analíticas devem ser iguais às correntes totais dadas em (3).

Uma vez obtidas analiticamente as correntes ideais dos filtros ativos, as mesmas devem ser adaptadas de modo a atenderem aos Procedimentos de Rede do ONS.

1.1.3 : Estudos de Desempenho Harmônico:

Utilizando a abordagem indicada pelos Procedimentos de Rede do ONS isola-se a rede interna do SIN.

Para o cálculo das correntes dos filtros ativos associados aos transformadores coletores, utiliza-se o procedimento indicado pela norma IEC 61000-3-6 [4], modificando o sistema dado em (8) para o sistema mostrado em (9).

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}_{m+1} \\ \vdots \\ \mathbf{I}_{m+k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \{ |z_{m+1,m+1}|^a - |z_{m+k+1,m+1}|^a \} & \cdots & \{ |z_{m+1,m+k}|^a - |z_{m+k+1,m+k}|^a \} \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ \{ |z_{m+k,m+1}|^a - |z_{m+2k,m+1}|^a \} & \cdots & \{ |z_{m+k,m+k}|^a - |z_{m+2k,m+k}|^a \} \end{bmatrix}^{-\frac{1}{a}} \times \begin{bmatrix} \{ |z_{(m+k+1, :)}|^a - |z_{(m+1, :)}|^a \} \times |\mathbf{I}_{orig}|^a \\ \vdots \\ \{ |z_{(m+2k, :)}|^a - |z_{(m+k, :)}|^a \} \times |\mathbf{I}_{orig}|^a \end{bmatrix}^{\frac{1}{a}} \quad (9)$$

Onde os valores do expoente 'a' dependem da ordem harmônica, conforme mostrado na Tabela 1.

Tabela 1: Valores do expoente 'a' em função da faixa harmônica

a	Ordem da Harmônica (h)
1	$h \leq 4$
1,4	$5 \leq h \leq 10$
2	$h \geq 11$

Uma vez determinadas as correntes dos filtros ativos ideais, devem-se calcular as correntes de Norton no PAC, considerando todas as fontes de corrente da rede do acessante, isto é, as fontes de corrente alocadas na baixa tensão (conversores eletrônicos) e as fontes de corrente alocadas na média tensão (filtros ativos).

Utilizando novamente o procedimento indicado pela norma IEC 61000-3-6, determina-se a corrente de Norton no PAC conforme a equação dada em (10):

$$|I_{h,PAC}| = \left(\sum_{i=1}^{m+k} |I_{h,i}|^a \right)^{\frac{1}{a}} \quad (10)$$

onde $I_{h,i}$ representa a contribuição da fonte de corrente "i" para a corrente de Norton no PAC de ordem harmônica "h".

Como os filtros ativos são ideais, compensam totalmente as correntes geradas pelas cargas não lineares de baixa tensão, anulando as correntes de Norton no PAC e consequentemente zerando as distorções de tensão no mesmo.

Na prática não existem filtros com desempenho ideal. Portanto, a metodologia proposta recomenda considerar os erros máximos nas respectivas correntes dos transformadores coletores, de modo que os limites especificados pelo ONS sejam atendidos. Ressalta-se que para a validação da metodologia proposta, estes erros máximos devem ser maiores que os erros totais de compensação especificados pelos fabricantes dos filtros.

Cabe destacar que o objetivo do controle de malha fechada dos filtros ativos pode ser a minimização dos erros de correntes nos respectivos transformadores coletores, implicando nos reduzidos erros totais de compensação especificados pelos fabricantes (aproximadamente $\pm 1\%$).

1.1.4 Capacidade nominal ("ratings") dos filtros ativos:

Para avaliar as máximas correntes harmônicas de regime permanente que os filtros ativos devem gerar, considerando as correntes oriundas da rede interna assim como do SIN, a metodologia proposta é baseada no procedimento indicado pela norma IEC 62001 [2] para filtros passivos em sistemas HVDC.

Portanto, deve-se aplicar o princípio de superposição nas fontes ativas do sistema considerando as premissas especificadas nos Procedimentos de Rede do ONS, isto é, a utilização da Norma IEC 61000-3-6 para a avaliação da corrente I_{FC} e a utilização do limite global inferior para a avaliação da corrente I_{FS} .

Desta maneira, calcula-se a corrente resultante no filtro para o harmônico 'h' como a raiz quadrada da soma quadrática das correntes $I_{FC,h}$ e $I_{FS,h}$, conforme mostrado em (11).

$$I_{F,h} = \sqrt{(I_{FC,h})^2 + (I_{FS,h})^2} \quad (11)$$

Observa-se que a diferença entre as equações (3) e (11) consiste em que esta última evita os possíveis subdimensionamentos das correntes harmônicas totais consideradas pela equação (3), utilizando uma composição quadrática ao invés de fasorial.

Após a obtenção de todas as correntes harmônicas resultantes do filtro que violaram os limites (correntes harmônicas de interesse), deve-se determinar a corrente nominal do mesmo utilizando o valor eficaz destas correntes, conforme especificado pelos fabricantes.

Assim, o cálculo da corrente nominal do filtro ativo (I_{nom}) é dada pela equação (12) [2]:

$$I_{nom} = \sqrt{\sum_{h \in \Omega} (I_{F,h})^2} \quad (12)$$

onde Ω é o conjunto dos harmônicos de interesse (que violaram os limites).

Uma vez descrita a metodologia proposta que viabiliza a utilização de filtros ativos na média tensão, pode-se usufruir das vantagens que os mesmos podem oferecer. De modo a enfatizar estas vantagens, na Tabela 2 mostra-se um comparativo entre as principais características dos filtros passivos e ativos.

Tabela 2: Comparativo entre os Filtros Passivos e Ativos

FILTRO PASSIVO	FILTRO ATIVO
- Modifica a rede passiva da rede interna, podendo requerer elevada potência reativa (devido à dissintonia) para atender ao limite.	- Não modifica a rede passiva da rede interna. Objetiva isolar grande parte da rede do novo acessante perante a influência do SIN.
- Pode reduzir pouco a corrente de Norton no PAC devido à dissintonia ou ao fator de qualidade baixo do filtro.	- Reduz significativamente as correntes de Norton no PAC.
- A inserção do filtro pode gerar uma nova ressonância, demandando um novo filtro.	- Não há a possibilidade do surgimento de novas ressonâncias.
- A elevada potência total dos filtros é dada pela soma linear das potências individuais dos filtros projetados, implicando em altos custos para o acessante.	- Como compensa a corrente eficaz total, precisa de menos potência para compensar todos os harmônicos ao mesmo tempo, reduzindo significativamente os custos.
- Como as contingências são probabilísticas, filtros projetados poderão não ser necessários.	- O filtro ativo está preparado para atender a característica probabilística das contingências consideradas ou não, pois pode filtrar de forma adaptativa todo o espectro harmônico de interesse.
- Contingências não consideradas nos estudos poderão implicar em filtros não previstos.	
- Incertezas e imprecisões nos estudos poderão implicar em sobrecargas nos filtros projetados, tornando-os ineficientes ou até mesmo inoperantes. Um reforço através de um novo filtro poderá ser necessário.	- Considera as incertezas e imprecisões, pois em caso de sobrecarga, a capacidade do filtro, projetado para atender a vários harmônicos ao mesmo tempo, poderá ser utilizada em sua maioria para compensar o harmônico em sobrecarga.
- Ocupam muito espaço na subestação.	- Ocupam um reduzido espaço na subestação.
- Filtros de elevada potência podem inviabilizar a operação do sistema do novo acessante	- Como não modifica a rede passiva da rede interna, não interfere na operação do sistema.
- Pior opção econômica e técnica quando muitos destes filtros de elevada potência são requeridos.	- Melhor opção econômica e técnica quando muitos filtros passivos de elevada potência são requeridos. (Atende ao critério de Mínimo Custo Global do Ministério de Minas e Energia).

2.0 - RESULTADOS

De modo a comprovar a teoria descrita neste trabalho, será mostrado um caso exemplo real de acesso de um empreendimento eólico. Em todas as simulações os LGs foram representados por polígonos de 'n' lados [5].

O caso exemplo trata sobre o impacto harmônico no PAC devido a um complexo eólico real de 180 MW, composto de 90 aerogeradores de 2 MW cada um, os quais estão distribuídos equitativamente em dois barramentos coletores de média tensão (34,5 kV) através de redes predominantemente subterrâneas, conforme mostrado na Figura 5. As correntes harmônicas produzidas por cada aerogerador, segundo o fabricante dos mesmos, assim como as correntes de Norton e as distorções de tensão no PAC para os treze primeiros harmônicos (exceto o 12º harmônico) do espectro de análise (2º até 50º harmônico) são mostradas na Tabela 3. Ressalta-se que foram nestes harmônicos que houve violação dos limites de tensão.

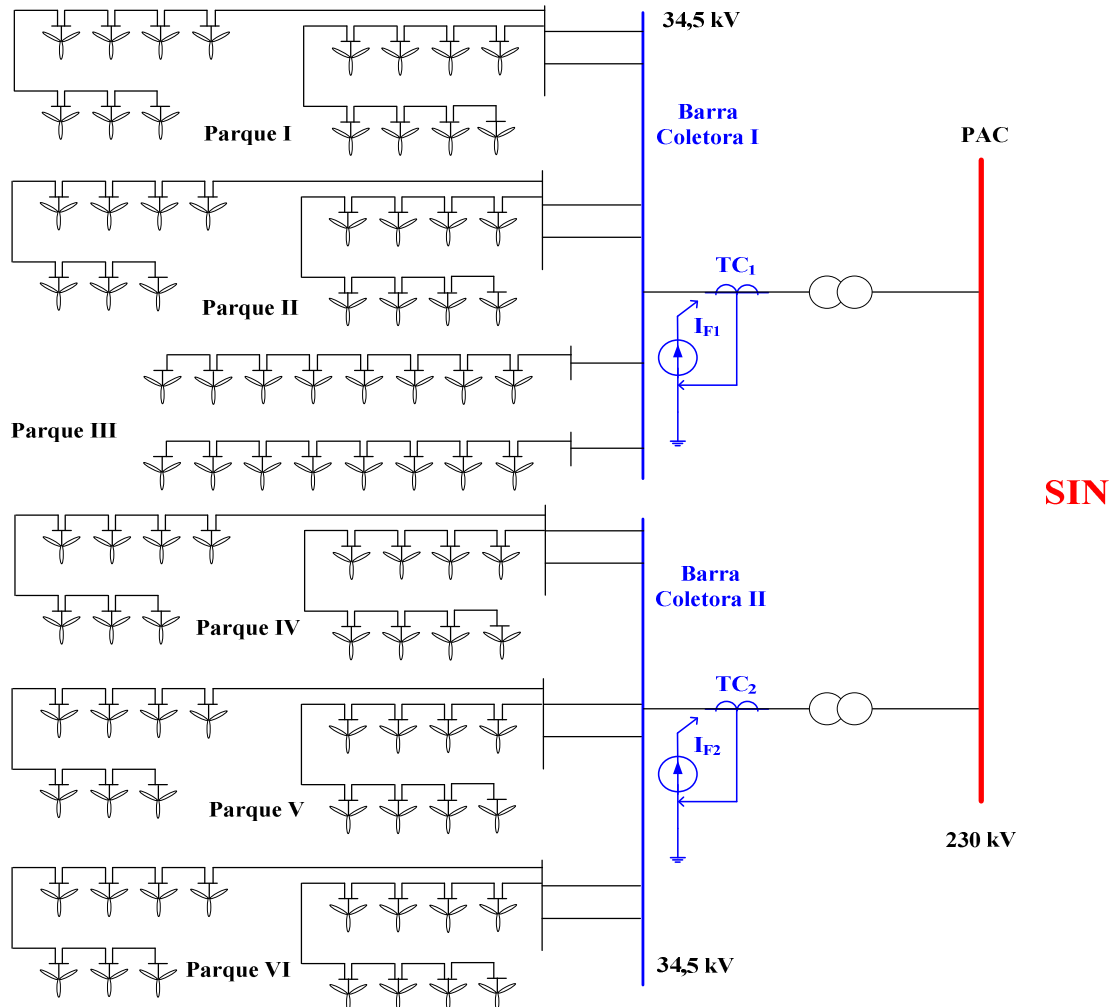


Figura 5: Complexo eólico real utilizado como exemplo

A alternativa tradicional adotada para atender aos limites, isto é, a utilização de filtros passivos na média tensão, demandou 5 filtros em cada barramento coletor da Central de Geração Eólica (CGE), sendo 4 filtros de sintonia simples projetados para o 2º (2,0 MVar), 3º (4,05 MVar), 4º (1,07 MVar) e 5º (0,94 MVar) harmônicos e 1 filtro passa alta (amortecido) projetado para o 7º (1,63 MVar) harmônico. A potência total dos 10 filtros sugeridos é de 19,4 MVar, implicando num custo aproximado de 8,5 milhões de reais.

As correntes de Norton e as tensões amortecidas no PAC devidas a estes filtros passivos recomendados também estão mostradas na Tabela 3.

Também foi utilizada a nova alternativa proposta neste trabalho para atender aos limites de desempenho harmônico no PAC e a capacidade nominal ("rating") dos filtros ativos. Esta alternativa demandou 10 filtros ativos, cinco em cada barramento coletor, conforme representado pelos filtros equivalentes mostrados na Figura 5.

Para a obtenção deste resultado, implementou-se no MATLAB a metodologia proposta, assim como o sistema elétrico composto pela CGE e pelas impedâncias dos LGs que maximizaram as tensões harmônicas no PAC sem a atuação de filtros, obtidas utilizando o programa HarmZs. Desta maneira, para o desempenho harmônico, utilizou-se a equação dada em (9) para o cálculo das correntes harmônicas (I_{FC1} , I_{FC2}) que os filtros ativos ideais devem injetar para compensar totalmente as correntes provenientes dos aerogeradores, implicando em correntes de Norton e distorções de tensão no PAC nulas conforme mostrado na Tabela 4. Como esperado, nesta tabela

também se verifica que estas correntes calculadas analiticamente são iguais às correntes de Norton determinadas para as duas barras coletoras da CGE.

Como estes filtros não são ideais, devem ser determinados os erros máximos de correntes nos transformadores coletores dos respectivos filtros ativos de modo que os limites do ONS não sejam ultrapassados.

Utilizando as propriedades de sistemas lineares (proporcionalidade e superposição) pode ser demonstrado que os erros de medição nas correntes dos transformadores são iguais aos erros das correntes dos filtros ativos. Assim, calcularam-se os erros nas correntes dos transformadores através das máximas e mínimas correntes dos filtros ativos, obtidas através de análises de tentativa e erro, tais que as distorções de tensão no PAC fossem próximas, porém inferiores, aos limites estabelecidos pelos Procedimentos de Rede do ONS. Desta forma, os menores erros obtidos nas correntes dos filtros ativos ($\pm 4\%$) ocorreram para o 7º harmônico (caso mais crítico), conforme mostrado na Tabela 5. Como $\pm 4\%$ é uma faixa de erros maior que a especificada pelos fabricantes ($\pm 1\%$), significa que a metodologia proposta é plenamente viável na prática.

Tabela 3: Distorções de tensão no PAC, correntes de cada aerogerador e de Norton no PAC

Freq. (Hz)	h	$I_{\text{aerogerador}}$ (pu)	$I_{\text{Norton_PAC}}$ Sem filtros(pu)	$I_{\text{Norton_PAC}}$ Com filtros(pu)	Dist_PAC (%) Sem filtros	Dist_PAC (%) Com filtros	Dist_PAC (%) Limite (ONS)
120	2	3,659e-05	0,0033288	0,003075	0,433	0,205	0,3
180	3	0,00016015	0,01477	0,0083678	8,148	0,598	0,6
240	4	2,7392e-05	0,0025759	0,00184	1,731	0,294	0,3
300	5	0,00021694	0,0057867	0,0035684	3,857	0,598	0,6
360	6	3,379e-05	0,00093098	0,00094909	0,628	0,196	0,3
420	7	0,00025093	0,0071946	0,0059434	4,611	0,588	0,6
480	8	2,0994e-05	0,00063171	0,00042858	0,377	0,097	0,3
540	9	4,1188e-05	0,0013135	0,00091534	0,799	0,302	0,6
600	10	1,3996e-05	0,00047864	0,00033884	0,376	0,133	0,3
660	11	7,5378e-05	0,001072	0,0007587	0,966	0,305	0,6
780	13	6,6381e-05	0,0011964	0,00081306	1,042	0,319	0,6

Tabela 4: Distorções de tensão no PAC, correntes dos filtros ativos e de Norton nas barras coletoras e no PAC

Freq. (Hz)	h	I_{FC1} (pu)	I_{Norton} Barra Coletora I (pu)	erro	I_{FC2} (pu)	I_{Norton} Barra Coletora II (pu)	erro	I_{Norton} PAC (pu)	Dist_PAC (%)
120	2	0,001651	0,001651	0%	0,001649	0,001649	0%	0	0
180	3	0,007248	0,007248	0%	0,007230	0,007230	0%	0	0
240	4	0,001245	0,001245	0%	0,001240	0,001240	0%	0	0
300	5	0,003343	0,003343	0%	0,003319	0,003319	0%	0	0
360	6	0,000524	0,000524	0%	0,000519	0,000519	0%	0	0
420	7	0,003927	0,003927	0%	0,003872	0,003872	0%	0	0
480	8	0,000332	0,000332	0%	0,000326	0,000326	0%	0	0
540	9	0,000659	0,000659	0%	0,000643	0,000643	0%	0	0
600	10	0,000227	0,000227	0%	0,000220	0,000220	0%	0	0
660	11	0,000549	0,000549	0%	0,000528	0,000528	0%	0	0
780	13	0,000501	0,000501	0%	0,000474	0,000474	0%	0	0

Tabela 5: Erros máximos nas correntes dos filtros (transformadores) determinados pela metodologia proposta

Freq. (Hz)	h	I_{FC1} (pu)			I_{FC2} (pu)		
		Ideal ($V_{PAC-7h=0\%}$)	Mínima ($V_{PAC-7h=0,585\%}$)	Máxima ($V_{PAC-7h=0,592\%}$)	Ideal ($V_{PAC-7h=0\%}$)	Mínima ($V_{PAC-7h=0,585\%}$)	Máxima ($V_{PAC-7h=0,592\%}$)
420	7	0,003927	0,003770 (erro - 4%)	0,004084 (erro +4%)	0,003872	0,003718 (erro - 4%)	0,004027 (erro +4%)

As correntes eficazes totais dos filtros ativos, calculadas utilizando-se os valores da Tabela 4, são 0,009210 pu e 0,009158 pu respectivamente, cujos valores em unidades elétricas são de 1107,79 A e 1101,59 A, obtidos para a potência base do sistema de 100 MVA e para a tensão base do filtro (480 V). Estas correntes demandariam 4 filtros ativos para cada circuito coletor, uma vez que a corrente nominal do filtro do fabricante é de 300 A. Observa-se que cada sistema de filtragem ativa possui seu respectivo transformador abaixador de média para baixa tensão (34,5 kV – 480 V).

Depois de obtidas as correntes harmônicas que os filtros ativos devem injetar para atender satisfatoriamente o estudo de desempenho harmônico no PAC, tem-se que determinar as correntes que os filtros devem injetar para compensar as máximas correntes provenientes do SIN. Portanto, utilizou-se o princípio de superposição na equação (8) para o cálculo destas correntes (I_{FS1} , I_{FS2}) nos filtros, conforme mostrado na Tabela 6. Nesta tabela

também são mostrados os limites globais de tensão (inferiores e superiores) assim como as impedâncias de Norton vistas dos barramentos coletores, com a finalidade de comprovar os valores das tensões nestes barramentos:

$$V_{PAC_Limite_Global_Inf} = V_{Barra\ Coletora} = Z_{Norton\ Barra\ Coletora} \times I_{FS1} = V_{Barra\ Coletora} = Z_{Norton\ Barra\ Coletora} \times I_{FS2}$$

Tabela 6: Distorções Globais de tensão no PAC, correntes dos filtros e impedâncias de Norton das barras coletoras da CGE

Freq. (Hz)	I_{FS1} (pu)		Z_{Norton} Barra Coletora I (pu)		I_{FS2} (pu)		Z_{Norton} Barra Coletora II (pu)		V_PAC Limite Global Inf.	V_PAC Limite Global Sup.
	Módulo	Ângulo(°)	Módulo	Ângulo(°)	Módulo	Ângulo(°)	Módulo	Ângulo(°)		
120	0,000356	89,97	28,051	-89,97	0,000270	89,98	37,000	-89,98	1,0%	1,33%
180	0,001073	89,94	18,638	-89,94	0,000812	89,96	24,625	-89,96	2,0%	2,67%
240	0,000719	89,92	13,912	-89,92	0,000543	89,94	18,425	-89,94	1,0%	1,33%
300	0,001808	89,89	11,061	-89,89	0,001361	89,92	14,694	-89,92	2,0%	2,67%
360	0,001093	89,85	9,148	-89,85	0,000820	89,89	12,199	-89,89	1,0%	1,33%
420	0,002574	89,82	7,770	-89,82	0,001921	89,87	10,409	-89,87	2,0%	2,67%
480	0,000743	89,77	6,726	-89,77	0,000552	89,84	9,061	-89,84	0,5%	0,67%
540	0,002540	89,73	5,905	-89,73	0,001874	89,81	8,006	-89,81	1,5%	2,00%
600	0,000954	89,68	5,240	-89,68	0,000699	89,77	7,157	-89,77	0,5%	0,67%
660	0,003200	89,62	4,688	-89,62	0,002323	89,74	6,458	-89,74	1,5%	2,00%
780	0,003930	89,49	3,817	-89,49	0,002793	89,66	5,370	-89,66	1,5%	2,00%

As correntes eficazes totais dos filtros ativos para esta situação são 0,006818 pu e 0,004974 pu respectivamente, cujos valores em unidades elétricas são de 820,06 A e 598,33 A. Estas correntes demandariam 3 filtros para o primeiro circuito coletor e 2 filtros para o segundo circuito coletor.

Para obter o número exato de filtros ativos necessários, foram utilizadas as equações dadas em (11) e (12) com as correntes dos filtros ativos determinadas nos casos de desempenho harmônico no PAC e de "rating" devido às correntes oriundas do SIN. Consequentemente, a corrente total do filtro do primeiro circuito coletor é de 1378,29 A, demandando 5 filtros ativos e a corrente total do segundo circuito coletor é de 1253,60 A demandando também 5 filtros. Estes 10 filtros possuem uma potência nominal de 2,49 MVA (12,8 % da potência dos filtros passivos).

O sistema de filtragem ativa, composto por 2 TCs, 2 transformadores abaixadores e 10 filtros ativos têm um custo aproximado de 3,0 milhões de reais, representando uma economia de aproximadamente 65% quando comparada a opção de filtragem passiva (8,5 milhões de reais).

De forma análoga à avaliação do desempenho harmônico no PAC, foram determinadas as máximas e mínimas correntes dos filtros ativos para esta situação, sem violar os limites globais superiores no PAC (Tabela 6), onde também foram verificados que os erros destas correntes máximas e mínimas nos filtros (transformadores) são maiores que os erros totais do sistema de filtragem dos fabricantes ($\pm 1\%$), conforme mostrado na Tabela 7, que mostra os resultados do caso mais crítico (7 harmônico).

Tabela 7: Erros máximos nas correntes dos filtros ativos (transformadores) devidos às correntes vindas do SIN

Freq. (Hz)	h	I_{FS1} (pu)			I_{FS2} (pu)		
		Ideal ($V_{PAC-7h=2\%}$)	Mín ($V_{PAC-7h=2,618\%}$)	Máx ($V_{PAC-7h=2,616\%}$)	Ideal ($V_{PAC-7h=2\%}$)	Mín ($V_{PAC-7h=2,618\%}$)	Máx ($V_{PAC-7h=2,616\%}$)
420	7	0,002574	0,001030 (erro - 60%)	0,003733 (erro +45%)	0,001921	0,000769 (erro - 60%)	0,002786 (erro +45%)

Ressalta-se que todas as vantagens de utilização de filtros ativos na etapa de projeto, descritas na Tabela 2, foram verificadas neste exemplo real. Para a operação futura da CGE com os filtros ativos, os mesmos estarão prontos para atuar e atender satisfatoriamente as outras condições apresentadas na mesma tabela.

3.0 - CONCLUSÃO

Neste trabalho foi proposta uma nova metodologia para a atenuação de distorções harmônicas de tensão no PAC utilizando filtros ativos na média tensão. Esta metodologia, além de contemplar os Procedimentos de Rede do ONS para os novos acessantes ao SIN, permitirá usufruir das diversas vantagens dos filtros ativos em relação aos filtros passivos, conforme verificado no caso exemplo real utilizado neste documento.

4.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Procedimentos de Rede - Submódulo 2.8 - Gerenciamento dos indicadores de desempenho da Rede Básica e de seus componentes – ONS – Operador Nacional do Sistema – www.ons.org.br.
- [2] Guide to the Specification and Design Evaluation of A.C. Filters for HVDC Systems.- Publicly Available Specification - Pre-Standard – IEC PAS 62001 first edition 2004-07

- [3] Cristiano de Oliveira Costa, Sergio Luis Varricchio e Franklin Clement Véliz, "Manual do Usuário da Versão 1.7 do Programa HarmZs", Relatório Técnico CEPEL, No. DSE 51747 / 2007.
- [4] Norma Internacional IEC 61000-3-6, "Electromagnetic compatibility (EMC) –Part 3-6: Limits – Assessment of emission limits for the connection of distorting installations to MV, HV and EHV power systems". Edition 2.0 2008-02.
- [5] Franklin Clement Véliz, Sergio Luis Varricchio e Cristiano de Oliveira Costa, "Metodologia para a Representação de Redes Elétricas por Polígonos de Admitâncias para Estudos de Impacto Harmônico", XXII SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Brasília – DF, 13 a 16 de Outubro de 2013.