



VI SBQEE

21 a 24 de agosto de 2005
Belém – Pará – Brasil



Código: BEL 02 7589
Tópico: Aplicação de Novas Tecnologias

FILTRAGEM DE COMPONENTES DE SEQÜÊNCIA ZERO: PROJETO DE FILTRO E RESULTADOS

RICARDO J O
CARVALHO

FURB

MARCELO PEREIRA

FURB

CLEBER A JÚNIOR

WEG

LUIZ D DURANTE

WEG

RESUMO

O trabalho apresenta uma alternativa não convencional para mitigação do problema da poluição harmônica em instalações elétricas de baixa tensão. Ao invés da filtragem passiva utiliza-se um dispositivo eletromagnético, similar ao enrolamento de transformador numa conexão zigue-zague, para filtragem das componentes harmônicas de ordem três e suas múltiplas. O trabalho apresenta uma sistemática para determinação da potência do filtro bem como a descrição de detalhes de projeto de um filtro de 5KVA. Apresenta-se resultados obtidos com um filtro especialmente desenvolvido e instalado próximo a uma carga com acentuado conteúdo harmônico. Os resultados demonstram a viabilidade técnica desta alternativa.

PALAVRAS-CHAVE

Distorção Harmônica, Filtro eletromagnético, Seqüência zero.

1.0 INTRODUÇÃO

A questão da geração e propagação de harmônicos constitui um dos fatores responsáveis pela degradação da qualidade da energia elétrica. Este tema tem merecido atenção crescente pelo pessoal técnico da área, tendo em vista a utilização de cargas não lineares usuais nas instalações elétricas de baixa tensão.

A utilização de filtros passivos para atenuar as componentes harmônicas constitui uma técnica

comumente aplicada e com resultados satisfatórios. Uma desvantagem desta técnica é a sua limitação visto que estes filtros são projetados para trabalhar sintonizado sob uma determinada condição de operação. Quaisquer alterações nas características da carga podem reduzir a eficiência da filtragem [1].

A filtragem ativa constitui uma técnica de atenuação harmônica bastante eficiente. Esta técnica apresenta-se como uma alternativa atrativa nas instalações que requerem um grau elevado de qualidade, entretanto, na maioria das vezes os elevados custos associados inviabilizam a aplicação destes dispositivos [2].

O presente trabalho investiga a utilização de um arranjo eletromagnético estático, do tipo transformador aterrado, para filtragem de componentes harmônicas de seqüência zero em instalações elétricas de baixa tensão com elevada distorção harmônica.

2.0 COMPONENTES HARMÔNICAS DE SEQÜÊNCIA ZERO

Cargas não lineares, a exemplo das existentes nas instalações de iluminação, equipamentos eletrônicos e de informática, determinam correntes cuja forma de onda é distorcida em relação a uma senoide pura. Esta distorção da forma de onda de corrente revela componentes harmônicas que fluem pelo sistema elétrico causando diversos problemas de qualidade de energia.

O método de componentes simétricas pode ser usado para identificar harmônicas de tensão e corrente em sistemas elétricos. Considerando um sistema trifásico de correntes com a forma de onda distorcida, a decomposição em suas componentes harmônicas pode ser expressa numa série de Fourier como

$$i_a = I_1 \cos(\omega_0 t) + I_2 \cos(2\omega_0 t) + I_3 \cos(3\omega_0 t) + \dots \quad (1)$$

$$i_b = I_1 \cos(\omega_0 t - 120^\circ) + I_2 \cos 2(\omega_0 t - 120^\circ) + I_3 \cos 3(\omega_0 t - 120^\circ) + \dots \quad (2)$$

$$i_c = I_1 \cos(\omega_0 t + 120^\circ) + I_2 \cos 2(\omega_0 t + 120^\circ) + I_3 \cos 3(\omega_0 t + 120^\circ) + \dots \quad (3)$$

onde os índices $1,2,3,\dots$ denotam a ordem da harmônica. As componentes de terceira harmônica,

$$I_3 \cos(3\omega_0 t), I_3 \cos(3\omega_0 t - 360^\circ) \text{ e } I_3 \cos(3\omega_0 t + 360^\circ),$$

estão em fase e, conforme mostrado na equação 4, a decomposição em componentes simétricas produz apenas a componente de seqüência zero.

$$\frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} I_{a3} \angle 0 \\ I_{b3} \angle 0 \\ I_{c3} \angle 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Esta constatação pode ser observada para as harmônicas múltiplas de três, isto é, de ordem 6, 9, 12, 15, etc.

3.0 FILTRO ELETROMAGNÉTICO DE SEQÜÊNCIA ZERO

Essencialmente o filtro de seqüência zero consiste de um arranjo especial de um transformador de aterramento ligado na conexão zigzague, conforme mostrado na figura 1.

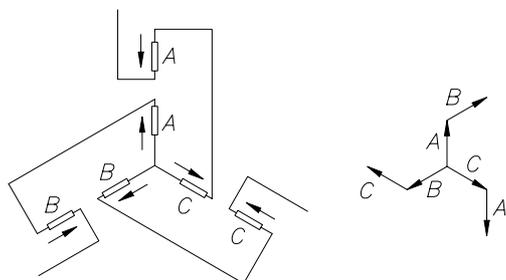


Figura 1 – Arranjo físico (elétrico + magnético) do filtro de seqüência Zero.

Neste arranjo o fluxo magnético resultante em cada enrolamento é o resultado da interação entre os fluxos de duas fases adjacentes. Esta conexão representa um caminho de baixa impedância, que pode se tornar dominante em relação ao restante do circuito elétrico ao qual o dispositivo se encontra inserido.

3.1 Princípio do filtro eletromagnético

O princípio de funcionamento do filtro eletromagnético, resumido a seguir, está bem documentada na referência [3]. A fundamentação a seguir é desenvolvida com base na hipótese de que os enrolamentos são alimentados através de um sistema trifásico equilibrado, as quedas de tensão nos enrolamentos são desprezadas, a operação do dispositivo ocorre na região linear, e as indutâncias próprias dos enrolamentos, bem como a mútua (L_M) entre eles são iguais entre si ($L_p=L_M=L$). Com base nessas hipóteses obtém-se para tensões de fase

$$v_{an}(t) = L \times \left(2 \frac{di_a}{dt} - \frac{di_b}{dt} - \frac{di_c}{dt} \right) \quad (5)$$

$$v_{bn}(t) = L \times \left(2 \frac{di_b}{dt} - \frac{di_a}{dt} - \frac{di_c}{dt} \right) \quad (6)$$

$$v_{cn}(t) = L \times \left(2 \frac{di_c}{dt} - \frac{di_a}{dt} - \frac{di_b}{dt} \right) \quad (7)$$

A indutância mútua entre dois enrolamentos é dada por

$$L_m = k \sqrt{L_1 L_2} \quad (8)$$

onde k é um fator que depende do projeto. Fazendo $k=1$, a indutância mútua será igual à indutância dos enrolamentos 1 e 2 (L_1 e L_2). Isto implica na necessidade de se reduzir a dispersão entre os enrolamentos adjacentes.

Convertendo as equações (5), (6) e (7) para o domínio da frequência, obtém-se, para uma ordem harmônica genérica "n", as seguintes equações:

$$\dot{V}_{AN_n} = jn\omega L (2\dot{I}_{A_n} - \dot{I}_{B_n} - \dot{I}_{C_n}) \quad (9)$$

$$\dot{V}_{BN_n} = jn\omega L (2\dot{I}_{B_n} - \dot{I}_{A_n} - \dot{I}_{C_n}) \quad (10)$$

$$\dot{V}_{CN_n} = jn\omega L (2\dot{I}_{C_n} - \dot{I}_{A_n} - \dot{I}_{B_n}) \quad (11)$$

Considerando que as correntes que circulam nos enrolamentos do filtro são componentes

harmônicas de ordem 3, chega-se as seguintes expressões para as tensões de fase:

$$\dot{V}_{AN3} = j3\omega L(2I_3\angle 0^\circ - I_3\angle -360^\circ - \dot{I}_3\angle 360^\circ) \quad (1)$$

$$\dot{V}_{BN3} = j3\omega L(2I_3\angle -360^\circ - I_3\angle 0^\circ - \dot{I}_3\angle 360^\circ) \quad (2)$$

$$\dot{V}_{CN3} = j3\omega L(2I_3\angle 360^\circ - I_3\angle 0^\circ - \dot{I}_3\angle -360^\circ) \quad (3)$$

(1)
(4)

De acordo com as equações (12), (13) e (14), as composições fasoriais das correntes harmônicas de ordem 3 resultam em tensões de terceiro harmônico nulas. A interpretação física para isto é que para a frequência em questão a impedância de seqüência zero é nula. Isto caracteriza a ação de um filtro ideal para as essas componentes.

3.2 Especificação da potência do filtro

Um parâmetro básico no projeto do filtro é a especificação da potência nominal. O filtro deve ser capaz de drenar para terra, além da componente de seqüência zero fundamental, todo conteúdo harmônico de ordem três e seus múltiplos. Portanto, para uma especificação precisa é necessário o levantamento das características da instalação, incluindo-se o conteúdo harmônico de tensão e corrente. Para estimar a potência nominal do filtro utilizou-se a equação (15), adaptada de [4 e 5].

$$S_N^2 = S_0^2 + S_h^2 + S_x^2 \quad (15)$$

A expressão é constituída de três componentes: uma componente de potência de seqüência zero fundamental, uma componente de potência harmônica e outra de potência cruzada.

A componente S_0 considera as correntes e tensões de seqüência zero, na frequência fundamental. Esta parcela de potência leva em conta eventuais desequilíbrios no sistema elétrico. O calculo de S_0 pode ser desenvolvido a partir das componentes simétricas de seqüência zero das tensões e correntes trifásicas por

$$S_0 = I_0 V_0 \quad (16)$$

A segunda componente S_h considera as tensões e correntes harmônicas de seqüência zero, isto é,

$$S_h = \frac{1}{2} \left[\sum_{k=3,6,9,\dots}^n I_k^2 V_k^2 \right]^{1/2} \quad (17)$$

A terceira componente, denominada de potencia cruzada, leva em conta a interação entre as componentes harmônicas de seqüência zero, resultante do produto de frequências diferentes.

$$S_x = \left[\frac{1}{4} \sum_{k=1r=1}^n \sum_{r \neq k}^n I_k^2 V_r^2 \right]^{1/2} \quad \forall k \times r = 3,6,9,\dots \quad (18)$$

Nas equações (17 e 18) n é a ordem do maior harmônico considerado.

3.3 Detalhes construtivos do filtro eletromagnético

A WEG transformadores, em cooperação com a Universidade de Regional de Blumenau (FURB), desenvolveu o filtro de harmônicos de seqüência zero. O projeto visou atenuar os harmônicos de seqüência zero do Laboratório de Computação Científica (LCC) do Centro de Ciências Tecnológicas da FURB. Após uma avaliação preliminar da instalação, alimentada na tensão de linha de 380V, definiu-se a potência para o filtro em 5KVA.

Foram construídos dois protótipos do filtro. O primeiro protótipo teve como ponto de partida os parâmetros de projeto de um filtro eletromagnético de 1KVA [3]. No protótipo construído, com potência de 5KVA, procurou-se melhorar o desempenho do filtro com a redução da dispersão. Os parâmetros deste primeiro protótipo estão resumidos na tabela a seguir.

Tabela 1: Folha de cálculo do filtro

FOLHA DE CALCULO			
CP: Filtro de Harmônicas de Sequência Zero			
Trifásico	Baixa Tensão -		
Potência (kVA)	5		
Frequência (Hz)	60		
Tensão de Linha (V)	380		
Tensão de Fase (V)	219	126,7	
Ligação (D / Y / Z)	Z	Zig-Zag	
Corrente / Fase - [Linha] (A)	7,6	[7,6]	
Volts / Espira	2,111111		
Espiras / Bobina	60	x 2	
Tensão / Bobina (V)	127	x 2	
Número Camadas ou Discos	4		
Isolamento entre Camadas	0,3	317 V/mm	
Condutor (mm) L1xE1 / L2xE2	4	2,8	
Medidas Externas (mm)	8,72 x 3,16		
Seção (mm ²)	10,65		
Densidade Corrente (A/mm ²)	0,71		
Peso Cobre + Isolamento (kg)	15,62		
Resist. a 75 °C (Ω)	0,106586	x 3	0,319698
Perda em Cobre (W)	18		
Indução (T)	1,37	Inrush (A) -	26,9
Diâmetro (Larg.) Núcleo (mm)	120		
Altura da Janela (mm)	185	W/m ² -	131
Espessura Max. Núcleo (mm)	50	Dist. Entre Fases (mm) -	4
Seção Efetiva Núcleo (cm ²)	57,60	Fator de Empilhamento -	0,96
Peso Núcleo (kg)	12,15	20,24	44,55
Perdas no Ferro (W)	60	Ruído (db) -	39
Perdas no Cobre + 30,1% (W)	24	Peso total (kg) -	71
Perdas Totais (W)	84		
Perdas - Último Tap (W)	95		
Corrente a Vazio (%)	1,49		
Impedância (%)	ER / EX =	0,48	0,14
		EZ =	0,50
Projetado por:	Cleber A.	em	19/5/2004
		Aprovado por:	

Algumas falhas no processo de fabricação foram observadas neste primeiro protótipo. Em decorrência disto os resultados obtidos não foram satisfatórios.

Através de ajustes no projeto e adaptações no processo de fabricação, desenvolveu-se um segundo protótipo. Nesta segunda versão a dispersão e a corrente de inrush foram consideravelmente reduzidas. Os resultados do ensaio de impedância de seqüência zero na segunda versão do filtro eletromagnético estão resumidos na tabela 2.

Tabela 2: Resultados de ensaio.

Ensaio de Impedância de Sequência Zero						
Corrente	Tensão	Vbase	Sbase	Zbase	Impedância de Seq. Zero	
(A)	(V)	(V)	(VA)	(Ω)	(Ω)	(%)
13,7	0,453	380	5000	28,88	0,0992	0,343

A figura 2 mostra o filtro eletromagnético de seqüência zero construído pela WEG Transformadores.



Figura 2: Vista do filtro eletromagnético de seqüência zero.

4.0 RESULTADOS OBTIDOS

O filtro eletromagnético, projetado para atenuar os harmônicos de seqüência zero em instalações de baixa tensão, foi instalado para testes no sistema elétrico do Centro de Ciências Tecnológicas da FURB. A figura 3 mostra o diagrama unifilar da instalação, que é atendida pela concessionária local na tensão de 24KV. A subestação conta com dois transformadores de 500KVA, onde a tensão é reduzida para 380/220V, no barramento principal da subestação. O alimentador que atende o (LCC) possui um barramento auxiliar localizado a uma distancia de aproximadamente 50m da SE. Do barramento auxiliar partem dois ramais sendo que um deles atende o LCC.

O filtro de seqüência zero foi instalado no barramento auxiliar conforme mostrado na figura 3. Utilizou-se a malha de terra local para aterrar o filtro. Um disjuntor termomagnético foi inserido no circuito para possibilitar a realização de manobras e promover uma proteção do filtro.

As medições foram realizadas no barramento principal da SE. Utilizou-se um aparelho portátil de medição de qualidade de energia para realizar as medições e programou-se o tempo de integração, para aquisição das leituras, para 10 segundos.

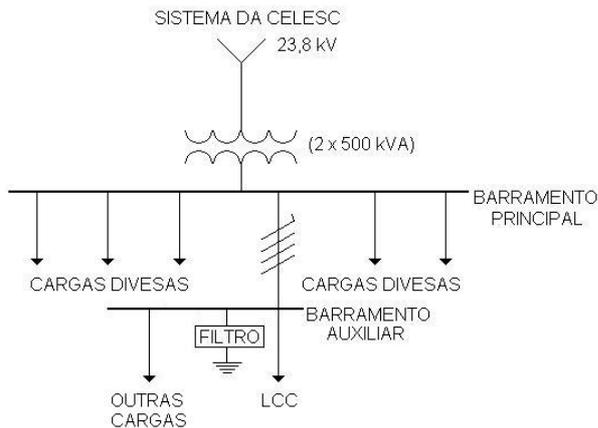


Figura 3: Diagrama unifilar da instalação.

Para facilitar a análise da massa de dados, dividiu-se o intervalo de aquisição de dados em dois períodos distintos: o primeiro, das 14h30min até às 18h30min foi considerado como o período normal, tendo em vista a pequena quantidade de usuários e equipamentos ligados no LCC, o segundo período, das 18h30min às 20h30min foi classificado como horário crítico visto que neste intervalo o LCC funciona a plena carga.

Um problema adicional na qualidade da instalação, constatado nas medições, foi o acentuado desequilíbrio da carga. A tabela 3 mostra valores médios das correntes registradas nas três fases.

Tabela 3: Valores médios de corrente.

Período	Fase a	Fase b	Fase c
	corrente (A)	corrente (A)	corrente (A)
Normal sem filtro	102,1	120	92,7
Normal com filtro	95,7	118,5	90,1
Crítico sem filtro	97,1	87,6	74,7
Crítico com	94,9	86	76,2

filtro			

Deve ser observado que as correntes no período normal, isto é à tarde, são maiores do que as registradas no período considerado crítico. Isto se deve ao fato de que durante o período da tarde diversas outras cargas, com reduzido conteúdo harmônico, estão ligadas ao sub ramal que deriva do barramento auxiliar.

A tabela 4 apresenta valores médios da taxa de distorção harmônica total de tensão e corrente, por fase.

Tabela 4: Valores médios de DHTv e DHTi.

Período	Fase a		Fase b		Fase c	
	DHT _v	DHT _i	DHT _v	DHT _i	DHT _v	DHT _i
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
Normal sem filtro	2,3	20,9	1,6	8,6	1,9	15,2
Normal com filtro	2,1	16,6	1,5	7,4	1,8	11,9
Crítico sem filtro	2,1	25,6	1,2	13,3	1,8	24,5
Crítico com filtro	1,9	20,6	1,3	11,7	1,8	17,7

4.1 Análise dos resultados

A eficiência do filtro eletromagnético de seqüência zero pode ser avaliada a partir dos resultados obtidos na tabela 5. As medidas registram os valores máximos de distorção harmônica de corrente, sendo o primeiro registro no intervalo em que o filtro estava conectado ao sistema e o segundo no intervalo com o filtro desligado.

Tabela 5: Registros de valores máximos

	Intervalo com o Filtro	Intervalo Sem o Filtro
Corrente da Fase A (A)	95,65	93,20

DHTI (%)	19,74	27,26
Ordem Harmônica	Percentual em relação à fundamental	Percentual em relação à fundamental
1	100	100
3	17,12	22,17
5	8,29	11,51
7	4,62	5,48
9	1,15	2,69

Com base nos valores apresentados nas tabelas 3, 4 e 5 apresenta-se, na tabela 6, o percentual de redução da distorção harmônica.

Tabela 6: Percentual de redução da DHT_i

Fase Analisada	Período	Percentual de Redução
Fase A	Normal	20,6 %
	Critico	19,5 %
Fase B	Normal	21,7 %
	Critico	27,8 %
Fase C	Normal	14,0 %
	Critico	12,0 %

Observa-se uma redução da corrente harmônica de 3^a ordem de 22,8% e, para corrente harmônica de 9^a ordem, uma redução de 57,3%.

5.0 CONCLUSÕES

O trabalho apresenta um arranjo especial de um transformador de aterramento como alternativa para filtragem de harmônicos de seqüência zero.

O resultado obtido com um protótipo do filtro de seqüência zero demonstra que este dispositivo é uma alternativa atrativa para atenuação da poluição harmônica nas instalações de baixa tensão.

O artigo descreve uma formulação para estimar a potência do filtro, baseada nas componentes simétricas de seqüência zero e nas componentes harmônica e cruzada da potência.

Alguns detalhes construtivos de um protótipo do filtro, com potência de 5KVA, são descritos.

Os resultados iniciais obtidos com a instalação do filtro num Laboratório de Computação, demonstram o bom desempenho do filtro eletromagnético de seqüência zero, chegando-se a reduções da ordem de 20%, para a corrente de terceiro harmônico, e de 50% para a de nono.

6.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Kusko H and Peeran S M, "Design of Power Harmonic Filters" Power Quality Proceedings, November, 1990.
- [2] Bettega E and Florina J N, "Filtros Ativos: uma nova e eficiente solução para harmônicas", Revista Eletricidade Moderna, Maio 1998.
- [3] Apolônio, R; Oliveira, J C; Vasconcellos, A B; Oliveira, A, Souto, O C N, "Filtro Eletromagnético para Harmônicos de Seqüência Zero". V SBQEE, Aracaju, 2003.
- [4] Marcos A B Galhardo e João T Pinho, "Conceitos de distorção e não linearidades", V SBQEE, 2003.
- [5] A E Emanuel, "Apparent Power: components and physical interpretation", 8a. ICHQP, October, 1998.