

ESTUDOS RELACIONADOS À OBTENÇÃO DA IMPEDÂNCIA HARMÔNICA DOMINANTE COM VISTAS À APLICAÇÃO DO MÉTODO DA SUPERPOSIÇÃO MODIFICADO

Ivan Nunes Santos, Alex Reis, José Carlos de Oliveira
Universidade Federal de Uberlândia
CEP 38400-902, Av. João Naves de Ávila, 2160, Bloco 3N, Uberlândia - MG
e-mails: ivan@eletrica.ufu.br, reialex@gmail.com, jcoliveira@ufu.br

Resumo - Tendo em vista as últimas orientações contidas em documentos da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), em especial o Módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição (PRODIST), este trabalho está focado em avançar nos estudos investigativos para implementação em campo de uma metodologia para o compartilhamento de responsabilidades sobre as distorções harmônicas presentes na rede elétrica de distribuição, pois é sabido que uma vez estabelecido valores de referência ou limites para a distorções harmônicas haverá, necessariamente, que se ter um mecanismo confiável para a atribuição de responsabilidade. Para tanto, parte-se da Metodologia da Superposição Modificada, a qual tem por princípio a inserção de uma impedância dominante no ponto de averiguação dos percentuais de responsabilidade dos agentes envolvidos (consumido e supridor) para a distorção harmônica total ali presente. Neste sentido, este trabalho pretende avaliar as principais estratégias voltadas para a obtenção de tal impedância dominante via implementação computacional do sistema teste de 14 barras do IEEE.

Palavras-Chave - Impedância Harmônica, Princípio da Superposição, Compartilhamento de Responsabilidades, Distorções Harmônicas, Qualidade da Energia.

STUDIES RELATED TO OBTAINING THE DOMINANT HARMONIC IMPEDANCE TOWARDS THE APLICATION OF MODIFIED SUPERPOSITION METHOD

Abstract – In view of the latest guidelines contained in documents from the Brazilian Electrical Energy Agency (ANEEL), in particular the Module 8 of Distribution Procedures (PRODIST), this work focuses on advance the research studies aiming a field implementation of a methodology for sharing of responsibilities on the harmonic distortion present in the distribution grid, since it is known that, once established references or limits values for the harmonic distortion, will be necessary a reliable mechanism for the allocation of responsibility. To

this end, it makes use of the Modified Superposition Method, which has the principle of insert a dominant impedance at the point of investigation of the percentual responsibility of the agents (supplier and consumer) for total harmonic distortion present here. In this way, this paper aims to assess the main strategies for obtaining such a dominant impedance via a computational implementation of the IEEE 14-bus test system.

Keywords – Harmonic Impedance, Superposition Method, Sharing of Responsibilities, Harmonic Distortion, Power Quality.

I. INTRODUÇÃO

Recomendações contidas em documentos do IEEE [1] e da IEC [2] e em outros recentemente aprovados pela ANEEL [3], contemplam, dentre outros indicadores de qualidade da energia elétrica, a temática das distorções harmônicas. Tais textos abordam, no contexto das distorções harmônicas, distintos assuntos vinculados com: definições, procedimentos de medição, valores de referência, etc. À luz destas determinações e reconhecendo que as soluções mitigadoras para a adequação dos indicadores de desempenho envolvem expressivos custos financeiros, surge a questão da busca de meios para a determinação das responsabilidades sobre eventuais violações dos limites previamente estabelecidos.

Dentre as propostas encontradas na literatura para a caracterização das parcelas de responsabilidades entre os agentes envolvidos, a saber, o supridor e o consumidor, há de se reconhecer que, de um modo geral, as metodologias fundamentadas em princípios que utilizam o domínio da frequência, conciliado com a superposição de efeitos [4,5], têm-se mostrado mais promissoras.

Não obstante a simplicidade deste procedimento no que tange aos seus conceitos vale ressaltar que diversas publicações afeitas ao tema [6-8] têm indicado que os processos de compartilhamento assim fundamentados se mostram com potencialidades promissoras e, por outro lado, com limitações impostas pelo desconhecimento das informações requeridas para aplicação da estratégia.

Tendo isto em mente, foram então conduzidas, pelo presente grupo de pesquisa, investigações diversas, as quais, por fim, culminaram em um procedimento simples e factível de ser aplicado a casos reais. Tal estratégia encontra-se, também, embasada no princípio da superposição e envolve a inserção de uma impedância harmônica dominante no Ponto



X CEEL - ISSN 2178-8308
24 a 28 de setembro de 2012
Universidade Federal de Uberlândia - UFU
Uberlândia - Minas Gerais - Brasil

de Acoplamento Comum (PAC), produzindo, deste modo, um procedimento diferenciado em relação ao estabelecido na literatura até o presente momento.

Vale observar que a mencionada impedância harmônica dominante se apresenta na forma de um filtro com frequência de ressonância ajustável ou outro que atenda as necessidades do método, o qual se configura como um recurso físico adicional que seria instalado junto ao PAC tão somente durante os trabalhos de medição para a extração das informações requeridas a aplicação do compartilhamento ora almejado. O método assim definido, devido as suas características e fundamentação distintas das propostas clássicas, foi designado de Método da Superposição Modificado. A obtenção desta impedância dominante, para efeito de implementação da metodologia ora considerada, tem sido feita, num primeiro momento, por meio da inserção de filtros harmônicos no PAC. Contudo, estudos voltados à avaliação de desempenho das diferentes topologias de filtragem ainda se faz necessário.

Neste sentido, este informe técnico encontra-se direcionado para os seguintes pontos focais:

- Considerações sobre o Método da Superposição Clássico;
- Apresentação do Método da Superposição Modificado voltado ao compartilhamento de responsabilidades;
- Síntese das principais topologias empregadas na filtragem harmônica e pré-seleção das que melhor se adaptem para os fins aqui almejados;
- Avaliação de desempenho das estratégias de filtragem selecionadas via estudos computacionais em um sistema elétrico teste de 14 barras do IEEE.

II. MÉTODO DA SUPERPOSIÇÃO

A Fig. 1 caracteriza uma configuração genérica e representativa de um sistema elétrico visto a partir do PAC entre o supridor e o consumidor. Nesta figura, o consumidor é representado por cargas lineares e não lineares, enquanto o sistema da concessionária, é simplificada e indicado através de um complexo não detalhado que compreende suas partes básicas constituintes.

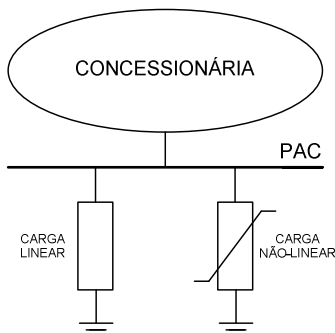


Fig. 1. Representação de um sistema elétrico a partir do PAC.

O arranjo físico apresentado pode ser melhor observado a partir de seu circuito equivalente de Norton, conforme mostrado na Fig. 2. Esta é uma técnica de modelagem no domínio da frequência e cada ordem harmônica é, genericamente, representada por h .

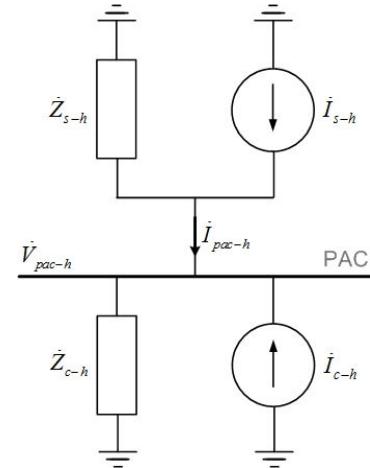


Fig. 2. Circuito equivalente de Norton do sistema elétrico para uma dada ordem harmônica h .

Na figura \hat{Z}_{s-h} e \hat{Z}_{c-h} são, respectivamente, impedância harmônica equivalente da concessionária e do consumidor para a ordem h ; \hat{I}_{s-h} e \hat{I}_{c-h} são, respectivamente, corrente harmônica de ordem h produzida pela concessionária e pelo consumidor; \hat{V}_{pac-h} e \hat{I}_{pac-h} são, respectivamente, tensão e corrente harmônicas de ordem h no PAC.

As equações (1) e (2), derivadas do circuito equivalente de Norton, estabelecem as correntes harmônicas geradas por cada uma das fontes de corrente representativas das cargas não lineares do supridor e do consumidor, respectivamente.

$$\hat{I}_{s-h} = \frac{\hat{V}_{pac-h}}{\hat{Z}_{s-h}} + \hat{I}_{pac-h} \quad (1)$$

$$\hat{I}_{c-h} = \frac{\hat{V}_{pac-h}}{\hat{Z}_{c-h}} - \hat{I}_{pac-h} \quad (2)$$

As contribuições, de cada uma das partes envolvidas, para a corrente total (\hat{I}_{pac-h}) e para a tensão total (\hat{V}_{pac-h}) no PAC, podem ser encontradas, como já ressaltado, por meio do princípio da superposição. Os circuitos relacionados com esta estratégia de análise podem ser visualizados nas Fig. 3(a) e (b). A primeira esclarece sobre a configuração destinada a determinação das contribuições advindas do circuito da concessionária para a tensão total e a segunda está associada com as contribuições provenientes do consumidor.

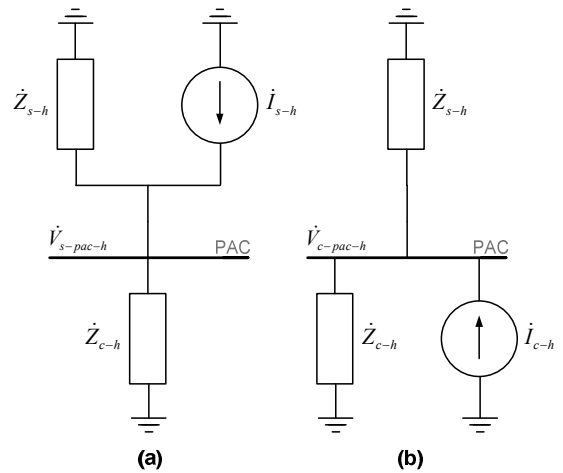


Fig. 3. Circuitos equivalentes para a determinação das contribuições harmônicas individuais de tensão no PAC para ordem harmônica h .

Tem-se na Fig. 3, que $\hat{V}_{s-pac-h}$ e $\hat{V}_{c-pac-h}$ são, respectivamente, contribuição de tensão harmônica de ordem

h da concessionária e do consumidor para a tensão total \dot{V}_{pac-h} . Estas contribuições podem ser determinadas através das equações (3) e (4).

$$\dot{V}_{s-pac-h} = \frac{\dot{Z}_{s-h}\dot{Z}_{c-h}}{\dot{Z}_{s-h}+\dot{Z}_{c-h}} \dot{I}_{s-h} \quad (3)$$

$$\dot{V}_{c-pac-h} = \frac{\dot{Z}_{s-h}\dot{Z}_{c-h}}{\dot{Z}_{s-h}+\dot{Z}_{c-h}} \dot{I}_{c-h} \quad (4)$$

A tensão total no PAC será:

$$\dot{V}_{pac-h} = \dot{V}_{s-pac-h} + \dot{V}_{c-pac-h} \quad (5)$$

O método da superposição de tensões estabelece que o compartilhamento das responsabilidades entre os agentes deve ser realizado por meio dos valores das projeções dos fasores representativos das contribuições individuais ($\dot{V}_{s-pac-h}$ e $\dot{V}_{c-pac-h}$) sobre o fasor da tensão total (\dot{V}_{pac-h}), como indicado na Fig. 4.

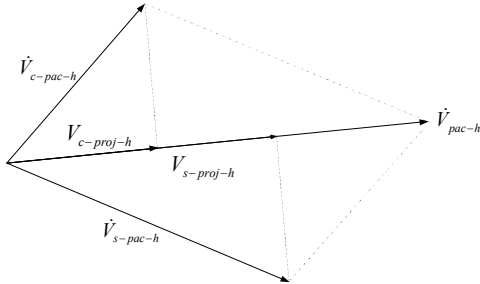


Fig. 4. Decomposição da tensão PAC em dois escalares advindos das projeções.

Em que, $V_{s-proj-h}$ e $V_{c-proj-h}$ são, respectivamente, as projeções de $\dot{V}_{s-pac-h}$ e $\dot{V}_{c-pac-h}$ sobre \dot{V}_{pac-h} .

Muito embora a simplicidade do método em questão, vale ressaltar que um dos pontos mais complexos para se atingir uma boa exatidão dos resultados encontra-se vinculado com a necessidade do pré-conhecimento das impedâncias harmônicas equivalentes da concessionária e do consumidor. Esta dificuldade, como demonstrado em [8], pode conduzir a resultados de compartilhamento com grandes erros.

III. MÉTODO DA SUPERPOSIÇÃO MODIFICADO

A metodologia apoia no princípio da superposição de tensões, como determinado pelas expressões (3) e (4), as quais evidenciam a relevância do conhecimento das impedâncias da concessionária e do consumidor [12]. A relação entre as impedâncias origina a constante complexa:

$$\dot{K}_h = \frac{\dot{Z}_{s-h}\dot{Z}_{c-h}}{\dot{Z}_{s-h}+\dot{Z}_{c-h}} \quad (6)$$

Introduzindo esta grandeza nas equações (3) e (4), obtém-se:

$$\dot{V}_{s-pac-h} = \dot{K}_h \dot{I}_{s-h} \quad (7)$$

$$\dot{V}_{c-pac-h} = \dot{K}_h \dot{I}_{c-h} \quad (8)$$

Nota-se, a partir das equações (7) e (8), que as parcelas de contribuição de cada um dos agentes envolvidos para a distorção harmônica total no PAC, para uma dada situação operacional, dependem exclusivamente dos valores complexo das correntes \dot{I}_{s-h} e \dot{I}_{c-h} . Portanto, para se realizar o compartilhamento de responsabilidades será suficiente o conhecimento destas correntes, ou mesmo, a relação de proporcionalidade entre as mesmas. À luz desta afirmativa, o procedimento aqui proposto consiste numa estratégia bastante simples, a qual se configura na inserção, no PAC, de um componente passivo que apresente como uma

impedância harmônica conhecida e dominante sobre aquelas referidas anteriormente (\dot{Z}_{s-h} e \dot{Z}_{c-h}). Isto orienta para a utilização de um arranjo na forma de filtro, que contemple as propriedades aqui almeçadas, conforme ilustra a Fig. 5.

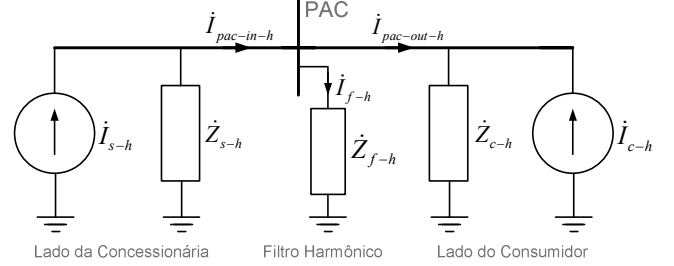


Fig. 5. Arranjo físico relacionado com o método da superposição modificado.

Na Fig. 5 \dot{Z}_{f-h} é a impedância harmônica equivalente do filtro para a ordem h ; \dot{I}_{f-h} é a corrente harmônica de ordem h drenada pelo filtro harmônico e $\dot{I}_{pac-in-h}$ e $\dot{I}_{pac-out-h}$ são, respectivamente, corrente harmônica de ordem h à montante e à jusante do PAC. Procedendo-se a aplicação do princípio da superposição, tem-se como resultado a Fig. 6.

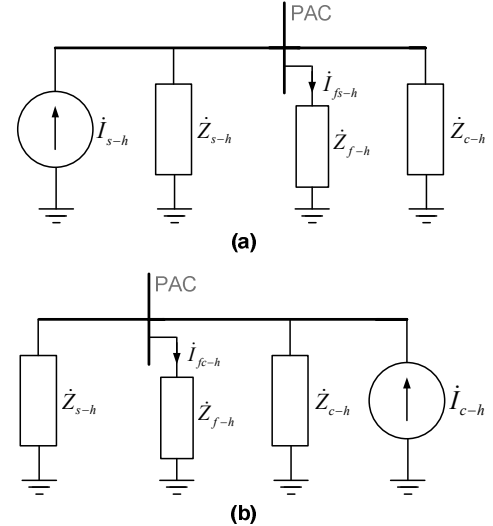


Fig. 6. Determinação das contribuições harmônicas de corrente de ordem h para a corrente total do filtro.

Em que \dot{I}_{fs-h} e \dot{I}_{fc-h} são, respectivamente, contribuições de corrente harmônica de ordem h da concessionária e do consumidor para corrente total do filtro \dot{I}_{f-h} .

Em vista do fato que, em se tratando de um filtro, a nova tensão harmônica de ordem h no PAC se apresentará com um valor bastante baixo, as seguintes observações são válidas:

- A impedância do filtro \dot{Z}_{f-h} é predominante sobre as demais impedâncias do sistema;
- Diante desta conjuntura a corrente \dot{I}_{fs-h} – Fig. 6a – é praticamente igual a \dot{I}_{s-h} ;
- Complementarmente, a corrente \dot{I}_{fc-h} – Fig. 6b – é aproximadamente igual a \dot{I}_{c-h} ;
- À luz destes fatos pode-se então escrever:

$$\dot{I}_{fs-h} \cong \dot{I}_{s-h} \cong \dot{I}_{pac-in-h} \quad (9)$$

$$\dot{I}_{fc-h} \cong \dot{I}_{c-h} \cong -\dot{I}_{pac-out-h} \quad (10)$$

Por fim, aplicando-se o princípio da superposição, tem-se que a corrente total de ordem h no filtro será:

$$\begin{aligned} \dot{I}_{f-h} &= \dot{I}_{fs-h} + \dot{I}_{fc-h} \\ &= \dot{I}_{s-h} + \dot{I}_{c-h} = \dot{I}_{pac-in-h} - \dot{I}_{pac-out-h} \end{aligned} \quad (11)$$

Uma vez encontradas \dot{I}_{fs-h} e \dot{I}_{fc-h} , estas serão também proporcionais às correntes \dot{I}_{s-h} e \dot{I}_{c-h} , tendo em vista a aplicação da metodologia da superposição de tensões, deve-se proceder, então, as projeções destes fasores sobre aquele representativo da corrente total \dot{I}_{f-h} , gerando, respectivamente, as projeções $I_{fs-proj-h}$ e $I_{fc-proj-h}$. Estas projeções são, conforme já afirmado, proporcionais àquelas atreladas com a metodologia da superposição de tensões.

IV. PRINCIPAIS ESTRATÉGIAS PARA OBTENÇÃO DA IMPEDÂNCIA DOMINANTE

A primeira ideia para a concretização da impedância dominante está atrelada, conforme já afirmado, com a implementação de um filtro harmônico conectado junto ao PAC [12]. Não obstante os aspectos gerais relacionados com este procedimento, é sabido, que nos dias atuais, existem diferentes estratégias e filosofias para concepção, projeto e especificação de filtros harmônicos.

Vale lembrar que os filtros harmônicos são arranjos elétricos destinados a oferecer meios para que as correntes harmônicas e, por conseguinte, as tensões sejam atenuadas. O princípio que norteia tais soluções classicamente empregadas na engenharia elétrica se baseia na obtenção de uma característica propícia ao processo de compensação nos termos esclarecidos em [13,14].

Os tipos mais comuns de filtros harmônicos passivos, quanto aos seus arranjos e filosofia de filtragem, podem ser agrupados como: filtros sintonizados ou filtros amortecidos. Os principais arranjos para os filtros sintonizados, segundo o número de frequências selecionadas, são:

- Filtros sintonizados em uma frequência: apresenta uma baixa impedância em apenas uma frequência de ressonância, trata-se tão somente de um circuito RLC série. Devido à sua simplicidade e ao custo competitivo, esta é a principal arquitetura de filtro usada em aplicações práticas;
- Filtros sintonizados em duas frequências: este arranjo possui, como indicado na sua identificação, duas frequências de sintonia, fato este que proporciona a filtragem harmônica para duas ordens distintas;
- Filtros sintonizados em três frequências: esta última configuração para os filtros sintonizados se destina a oferecer três pontos de ressonância.

Já, os tipos mais comuns de filtros amortecidos são:

- Filtros amortecidos de 1ª ordem: trata-se tão somente de um circuito RC série. Apesar da simplicidade de seu arranjo construtivo, esta configuração não é muito utilizada por requerer um grande capacitor. Somado a isto, há ainda de considerar que esta topologia possui perdas relativamente elevadas na frequência fundamental [15];
- Filtros amortecidos de 2ª ordem: é a principal configuração de filtro com amortecimento usada em campo;
- Filtros amortecidos de 3ª ordem: trata-se de um dispositivo com uma curva de filtragem mais eficiente, todavia, na prática, não é muito empregado por ser de elevado custo;

- Filtros amortecidos tipo C: este possui uma topologia que diverge dos demais arranjos amortecidos pelo fato de acrescentar um ramo RLC série sintonizado à frequência fundamental ou outra predefinida pelas necessidades.

No presente trabalho, os filtros sintonizados de duas e três frequências não serão analisados, por serem de custos mais elevados, pouco flexíveis a múltiplos ajustes, factíveis de geração de ressonâncias indesejáveis nas faixas entre frequências de filtragem, além, é claro, de poderem ser substituídos por filtros amortecidos. Em relação às topologias do tipo amortecido, não serão considerados os filtros amortecidos de primeira ordem, porque apresentam-se com consideráveis níveis de perdas à frequência fundamental e possuem baixa eficácia para ordens harmônicas inferiores, além de necessitarem de um valor de capacitância de grande montante. Portanto, tem-se na Fig. 7 os arranjos de filtragem harmônicas a serem analisados.

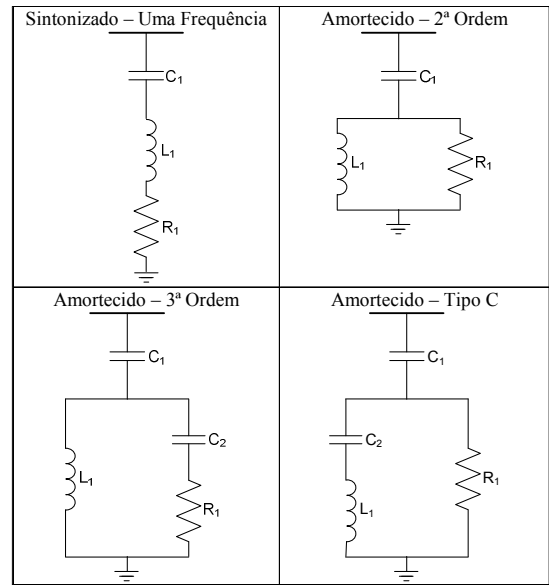


Fig. 7. Circuitos elétricos dos filtros harmônicos selecionados.

V. ANÁLISE COMPARTIVA DAS ESTRATÉGIAS PARA OBTENÇÃO DA IMPEDÂNCIA DOMINANTE VIA IMPLEMENTAÇÃO NO SISTEMA DE 14 BARRAS IEEE

O sistema teste ora pautado está descrito, conforme já dito, nas referências [9-11]. O mesmo foi implementado no ATP e não será aqui reportado devido à limitações impostas ao tamanho do artigo. O arranjo elétrico original não possui cargas poluidoras (não lineares), por isso, em consonância com o foco desta pesquisa, foram adicionadas nos principais barramentos de carga do sistema elétrico em questão fontes de correntes harmônicas representativas da presença de cargas não lineares. Tais fontes foram adotadas como atreladas com as ordens harmônicas 5, 7, 11 e 13, as quais são representativas, por exemplo, da operação de unidades retificadoras de 6 e 12 pulsos. Quanto aos níveis das correntes injetadas, estas compreenderam valores percentuais em relação à potência nominal da carga em foco, variando de 5 a 20% da magnitude desta. Dentro desta hipótese, têm-se os valores de injeções harmônicas apresentados na Tabela I.

TABELA I

Fontes de distorções adicionadas ao sistema de 14 barras

Barra	\hat{I}_{5h} (A)	\hat{I}_{7h} (A)	\hat{I}_{11h} (A)	\hat{I}_{13h} (A)
3	103,9±222°	68,9±171°	43,5±167°	33,9±122°
4	29,7±167°	17,0±50°	38,2±256°	29,7±6°
6	83,8±2°	57,3±87°	50,9±240°	38,2±111°
9	216,4±105°	154,9±215°	108,2±51°	93,3±154°
13	33,9±153°	27,6±260°	55,2±92°	35,0±34°
14	78,5±137°	70,0±108°	62,4±23°	38,6±48°

A Tabela II apresenta as distorções harmônicas individuais e totais de tensão para as 14 barras do sistema avaliado, uma vez realizada injeção de correntes distorcidas.

TABELA II

Distorções individuais e totais de tensão no sistema de 14 barras do IEEE com a inserção das fontes poluidoras

Barra	DIT_{5h} (%)	DIT_{7h} (%)	DIT_{11h} (%)	DIT_{13h} (%)	DTT (%)
1	4,52	3,67	1,31	3,85	7,10
2	5,58	4,40	1,53	3,87	8,23
3	5,78	3,88	3,75	2,80	8,39
4	7,01	4,84	0,91	2,14	8,83
5	6,77	4,91	1,13	2,82	8,90
6	7,61	4,72	1,37	1,13	9,13
7	7,78	3,74	1,78	0,51	8,83
8	7,26	3,49	1,66	0,53	8,24
9	8,90	3,14	3,08	0,67	9,95
10	8,64	3,41	2,73	0,35	9,69
11	8,11	4,06	2,07	0,43	9,31
12	7,71	4,54	1,65	1,56	9,23
13	7,85	4,43	1,94	1,91	9,42
14	8,87	5,03	4,75	1,75	11,38

A tabela anterior evidencia que o barramento de número 14 apresenta-se, de uma forma geral, como o principal ponto afetado pelas distorções harmônicas individuais (DIT) e totais (DTT). Diante deste fato, tal barra foi selecionada para o presente estudo de compartilhamento de responsabilidades, sendo, por conseguinte, considerada como ponto de acoplamento comum (PAC) entre o consumidor e o suprimento (arranjo equivalente da rede elétrica de suprimento que incorpora todos os geradores, compensadores, linhas e demais cargas). Vale ainda ressaltar, que as distorções harmônicas de 5ª, 7ª, 11ª e total ultrapassaram, neste barramento, os valores de referências estabelecidos no PRODIST [3] e, por outro lado, as distorções harmônicas de 13º ordem se mostraram com valores relativamente pequenos, não ultrapassando os valores de referência, por tal motivo estas últimas não serão aqui contempladas para efeito dos estudos de compartilhamento de responsabilidades.

Neste sentido e procurando-se estabelecer valores gabaritos ou esperados para fins da atribuição de responsabilidades, tornou-se essencial a determinação, neste momento, dos níveis individuais de contribuições vinculadas com a denominada “rede equivalente” e a carga suprida pelo barramento 14. Para tanto, foram empregadas as técnicas de análise fundamentadas no tradicional método da superposição. A Tabela III indica os valores das impedâncias e fontes de correntes harmônicas equivalentes do circuito elétrico do sistema supridor e do consumidor, os quais são imprescindíveis à aplicação do método da superposição clássico. Estas grandezas somente foram factíveis de serem encontradas devido ao pleno conhecimento das impedâncias harmônicas do arranjo utilizado, o qual, encontra-se, também, implementado no simulador ATP.

TABELA III

Impedâncias e fontes harmônicas equivalentes do sistema elétrico observadas a partir do barramento 14

Ordem	Impedâncias Harmônicas Equivalentes		Fontes de Correntes Harmônicas Equivalentes	
	Supridor	Consumidor	Supridor	Consumidor
5	2,767±29,5°	12,750±3,9°	295,6±96,8°	78,5±137°
7	3,226±55,8°	12,770±2,8°	91,7±123,6°	70,0±108°
11	4,018±44,4°	12,780±1,8°	45,8±51,9°	62,4±23°

Na sequência, aplicou-se o método da superposição clássico, obtendo-se os resultados constantes da Tabela IV.

TABELA IV

Percentuais de responsabilidades entre o sistema supridor e o consumidor – Valores Esperados

Ordem	Resultado das Projeções	Parcelas de Responsabilidades	
		Supridor	Consumidor
5	$V_{c-proj-5h} = 675,132 V$ $V_{s-proj-5h} = 153,431 V$	81,5%	18,5%
7	$V_{c-proj-7h} = 255,822 V$ $V_{s-proj-7h} = 194,303 V$	56,8%	43,2%
11	$V_{c-proj-11h} = 142,301 V$ $V_{s-proj-11h} = 197,868 V$	41,8%	58,2%

Uma vez calculados os valores esperados, os trabalhos prosseguiram no sentido da aplicação do Método da Superposição Modificado utilizando-se das diferentes topologias de filtros harmônicos já previamente selecionadas. Assim, a Tabela V apresenta os parâmetros dos filtros definidos para os fins deste trabalho e os casos avaliados.

TABELA V

Casos avaliados e respectivas parametrizações dos filtros empregados no sistema de 14 barras do IEEE

Caso	Filtro Harmônico		Parâmetros do Filtro			Observações
	Tipo	Especificação	R	L	C	
1	sintonizado	1 frequência	$R_1 = 0,5\Omega$	$L_1 = 4mH$	$C_1 = 69\mu F$	para 300Hz
2	sintonizado	1 frequência	$R_1 = 0,5\Omega$	$L_1 = 2,1mH$	$C_1 = 69\mu F$	para 420Hz
3	sintonizado	1 frequência	$R_1 = 0,5\Omega$	$L_1 = 0,85mH$	$C_1 = 69\mu F$	para 660Hz
4	amortecido	2º ordem	$R_1 = 30\Omega$	$L_1 = 4mH$	$C_1 = 69\mu F$	a partir de 300Hz
5	amortecido	3º ordem	$R_1 = 30\Omega$	$L_1 = 4mH$	$C_1 = 69\mu F$ $C_2 = 41\mu F$	a partir de 300Hz
6	amortecido	tipo C	$R_1 = 30\Omega$	$L_1 = 4,2mH$	$C_1 = 69\mu F$ $C_2 = 1670\mu F$	a partir de 300Hz

Para o dimensionamento dos filtros adotou-se, como premissa, a necessidade de uma compensação reativa, que neste caso em particular foi de $5MVA_r$ para a frequência fundamental. Não obstante tal opção, vale ressaltar que não há qualquer compromisso desta hipótese para a seleção do banco de capacitores que norteará os demais componentes do filtro. Os demais elementos foram ajustados em consonância com as propriedades almejadas e particularmente aplicadas a uma ou outra configuração.

Uma vez inseridos, individualmente, cada filtro supra especificado, os trabalhos computacionais foram, então, conduzidos com base na Metodologia da Superposição Modificada. Diante das informações computacionais obtidas, pôde-se chegar-se aos resultados para os compartilhamentos de responsabilidade sintetizados na Tabela VI.

TABELA VI

Percentuais de responsabilidades entre o sistema supridor e o consumidor para cada caso avaliado

Referência	Parcelas de Responsabilidade					
	Supridor			Consumidor		
	5h	7h	11h	5h	7h	11h
Valores Esperados	81,5%	56,8%	41,8%	18,5%	43,2%	58,2%
Caso 1	80,9%	-	-	19,1%	-	-
Caso 2	-	54,1%	-	-	45,9%	-
Caso 3	-	-	38,5%	-	-	61,5%
Caso 4	78,4%	3,4%	31,7%	21,6%	96,6%	68,3%
Caso 5	78,9%	13,0%	38,2%	21,1%	87,0%	61,8%
Caso 6	77,4%	1,3%	42,0%	22,6%	98,7%	58,0%

Os resultados evidenciam que:

- Para efeito do compartilhamento de responsabilidades sobre as distorções harmônicas, os filtros sintonizados se apresentaram com melhor eficiência e desempenho, conduzindo a resultados com baixos níveis de discrepâncias quando comparados aos valores esperados;
- Os filtros amortecidos se apresentaram com maiores erros de atribuição de responsabilidades, todavia há de se considerar que as discrepâncias encontradas para o compartilhamento de 5ª e 11ª ordem se mostraram, de uma forma geral, dentro de níveis aceitáveis. Isto se deve ao fato de que os filtros amortecidos, apresentam uma baixa magnitude de impedância na ordem 5, enquanto que na 11ª ordem, apesar da impedância do filtro não ser tão reduzida, verifica-se uma elevação da impedância do sistema, tornando-se, assim, o dispositivo de filtragem dominante;
- Não obstante aos resultados satisfatórios dos filtros sintonizados, vale ressaltar que tais dispositivos, quando empregados em ordens harmônicas superiores, podem elevar os níveis de distorção das ordens inferiores.

VI. CONCLUSÕES

Este informe técnico contemplou uma questão de grande relevância na atualidade, a qual está atrelada com o compartilhamento sobre as responsabilidades entre o agente supridor e o consumidor no que tange as distorções harmônicas. Neste cenário, foram sintetizados os principais pontos associados com as propostas encontradas na literatura, as quais, de um modo geral, se fundamentam nos princípios da superposição de efeitos. E, muito embora a praticidade e simplicidade dos procedimentos clássicos estabelecidos, a utilização dos mesmos encontra grandes barreiras quando da caracterização e obtenção dos parâmetros representativos das impedâncias harmônicas equivalentes dos agentes envolvidos. À luz destas constatações, surgiu-se o Método da Superposição Modificado, o qual tem por princípio a inserção de uma impedância dominante no PAC. Neste sentido, este trabalho foi centrado numa análise de desempenho de quatro diferentes estratégias, previamente selecionadas, de filtragem harmônica. Os resultados orientam para o fato que a obtenção de impedância dominante via uso de filtros sintonizados resulta em uma maior correspondência entre valores esperados e obtidos, sendo, portanto, a melhor estratégia a ser empregada. Não obstante a tal constatação, maiores investigação ainda se fazem necessárias.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] IEEE – INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. Std. 519-1992 – IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems. New York, 1992.
- [2] IEC – INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 61000-3-6 – Electromagnetic Compatibility (EMC) – Part 3: Limits - Section 6: Assessment of emission limits for distorting loads in MV and HV power systems - Basic EMC. Paris, 1996.
- [3] ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Nacional – PRODIST: Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica. Brasília, 2010.
- [4] W. Xu, Y. Liu, “A method for determining customer and utility harmonic contributions at the point of common coupling”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 15, no. 2, pp 804-811, April 2000.
- [5] W. Xu, Y. Liu, “A method to determine customer harmonic contributions for incentive-based harmonic control applications”, *IEEE Panel on Harmonic Measurements and Allocation*, pp 361-366, 1999.
- [6] S.F.P. Silva, J.C. Oliveira, “The sharing of responsibility between the supplier and the consumer for harmonic voltage distortion: A case study”, *Electric Power System*, v. 78, Issue 11, p. 1959-1964, 2008.
- [7] J.C. Oliveira, S.F.P. Silva, I.V. Santos, F.H. Costa, “A Case Study of Sharing the Harmonic Voltage Distortion Responsibility Between the Utility and the Consumer”, *International Conference on Renewable Energies and Power Quality*, Valencia (Spain), April 2009.
- [8] F.H. Costa, Uma Contribuição à Avaliação de Desempenho dos Principais Métodos para a Modelagem de Cargas nos Estudos do Compartilhamento das Responsabilidades sobre as Distorções Harmônicas. 84 f. Dissertação (Mestrado) - UFU, Uberlândia, 2009.
- [9] A.J. Conejo, F.D. Galiana, I. Kockar, “Z-Bus loss allocation”, *IEEE Trans. Power Systems*, v. 16, no. 1, pp 105-110, 2001.
- [10] C.A. Cañizares, S.K.M. Kotsi, “Modeling and simulation of IEEE 14 bus system with FACTS controllers”, *IEEE Technical Report*, 2003.
- [11] W.R. Mendes, Influência das Conexões dos Transformadores de Potência na Propagação dos Afundamentos de Tensão pelo Sistema Elétrico. 152 f. Dissertação (Mestrado) - UFU, Uberlândia, 2008.
- [12] I.N. Santos, Método da Superposição Modificado como uma Nova Proposta de Atribuição de Responsabilidades sobre Distorções Harmônicas. 161 f. Tese (Doutorado) - UFU, Uberlândia, 2011.
- [13] A. Budak, Circuit theory fundamentals and applications, USA: Prentice Hall, 1978.
- [14] A.C.B. Alves, Análise de Problemas e Procedimentos na Determinação de Filtros Harmônicos. 416 f. Dissertação (Mestrado) - UFU, Uberlândia, 1991.
- [15] E.W. Kimbark, Direct current transmission, vol. 1, USA: Wiley-Interscience, 1971.