

Projeto e Estudo de Filtros Harmônicos Amortecidos em Sistemas Elétricos de Potência

Eduardo Ruiz Rubio¹ (IC), Arthur Costa de Souza (PQ)¹

¹Universidade Federal de Itajubá - Campus Itabira.

Palavras-chave: Filtros harmônicos, Ressonância, Frequência.

Introdução

Nas últimas décadas, o aumento da dependência de equipamentos eletrônicos e sistemas de potência complexos tem levado a um crescimento significativo de harmônicos nas redes elétricas. Esses harmônicos, que são múltiplos inteiros da frequência fundamental, podem distorcer as formas de onda da corrente e da tensão, causando problemas como perda de eficiência, superaquecimento de equipamentos e degradação do desempenho dos sistemas elétricos (ANEEL, 2022 PRODIST - Módulo 8).

Além dos problemas técnicos, os harmônicos também podem comprometer a qualidade da energia fornecida aos consumidores finais, resultando em falhas em dispositivos sensíveis e aumento nos custos operacionais de empresas e indústrias (Souza et al., 2020). Esses efeitos adversos não apenas ameaçam a integridade dos sistemas elétricos, mas também podem afetar a segurança e a confiabilidade das operações em ambientes industriais e comerciais. Para mitigar esses efeitos, a utilização de filtros harmônicos tornou-se uma abordagem indispensável.

Esses dispositivos são projetados para reduzir ou eliminar as componentes harmônicas presentes na rede elétrica, assegurando um fornecimento de energia mais estável e eficiente. Este trabalho examina os princípios de funcionamento dos filtros harmônicos, em especial os filtros amortecidos e seus benefícios obtidos na melhoria da qualidade da energia elétrica.

Metodologia

Nesta seção, detalha-se a metodologia aplicada para a análise do sistema elétrico fictício e o dimensionamento de um filtro harmônico amortecido, com o objetivo de mitigar a distorção harmônica e prevenir ressonâncias no sistema.

1. Sistema Elétrico Analisado e Sistema PU

O primeiro passo é a definição da configuração e parametrização do sistema elétrico sob estudo, que inclui a concessionária, o transformador, e as cargas lineares e não lineares. A partir dessas informações, são determinados os parâmetros principais do sistema, como

a relação X/R e as potências envolvidas.

Em seguida, é realizada a parametrização dos elementos do sistema, como a concessionária, o transformador, a carga motora e a carga não linear, além da injeção de correntes harmônicas pela carga não linear. As informações dessas correntes são essenciais para a posterior análise da distorção harmônica.

Para corrigir o fator de potência da carga motora, calcula-se a potência reativa necessária para atingir o valor desejado. A potência do capacitor é dimensionada e conectada ao sistema, conforme apresenta a Figura 1.

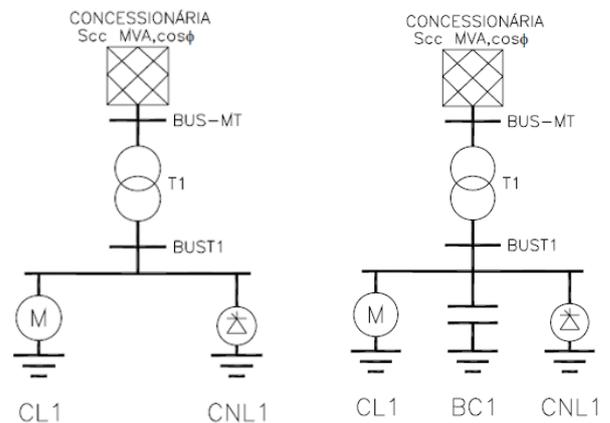


Figura 1 – Sistema inicial e sistema com capacitor para correção de FP.

A Tabela 1 apresenta as informações referentes ao sistema elétrico sob estudo. Vale ressaltar que o banco de capacitor foi calculado em 90,43 kVAr para corrigir o fator de potência do motor em 0,95.

2. Sistema PU

O método de normalização por unidade (PU) é aplicado para simplificar os cálculos do sistema. Inicialmente, define-se uma potência base (100 MVA) e, com base nas tensões nominais (13,2 kV e 380V), calcula-se a impedância base tanto para o lado de alta quanto para o lado de baixa tensão do transformador. Com isso, transforma-se as impedâncias dos elementos do sistema para seus respectivos valores em PU.

Tabela 1 – Parametrização dos elementos que compõe o sistema elétrico fictício

Elementos da rede elétrica	Parametrização
Concessionária	$SCC = 100 \text{ MVA}$ (simétrico 3φ) Relação X/R = 10
Transformador	$Z\% = 5,75(\Delta/Y - \text{solidamente aterrado})$ Relação X/R = 4,70 Potência = 500 kVA Tensões = 13,2 kV / 380 V
Carga motora (CL1)	$P = 90 \text{ kW}$ $Fp = 0,60$ indutivo do tipo motor com $I_p/I_N = 8$
Carga não linear (CNL1)	$S = 150 \text{ kVA}$ $Fp = 0,92$

Após determinar as impedâncias, prossegue-se com a análise dos ângulos das impedâncias, que permitem separar as componentes resistivas e reativas de cada elemento. Em seguida, determinam-se as correntes e as respectivas ordens harmônicas geradas pela carga não linear.

3. Análise Harmônica

Com os valores das correntes harmônicas, o próximo passo é calcular as impedâncias harmônicas dos componentes do sistema para as diferentes ordens (5ª, 7ª, 11ª e 13ª). Utilizam-se as equações de (1) a (5) para os componentes do sistema, como concessionária, transformador, cargas lineares (motores de indução) e capacitor para cada ordem harmônica sob análise.

Transformador: $Z_h = R_T * h^{1,5} + jX_T * h$ (1)

Concessionária: $Z_{Conc} = R_{Conc} * \sqrt{h} + jX_{Conc} * h$ (2)

Cargas lineares: $Z_L = R_L * (0,1 * h + 0,9) + jX_L * h$ (3)

$$Z_{Mh} = Z_M \cos\left(\tan^{-1}\left(\frac{IP}{IN}\right)\right) +$$
 (4)

Motores de indução: $Z_M \sin\left(\tan^{-1}\left(\frac{IP}{IN}\right)\right)$

Capacitor: $Z_C = -jX_C/h$ (5)

Vale ressaltar que a equação (3) e (4) assumem resultados muito próximo. E em relação a variável Z_M da equação (4), a mesma pode ser encontrada conforme apresenta a equação (6).

$$Z_M = \frac{(U_N)^2}{\frac{P_M * IP}{FP} / IN}$$
 (6)

A partir das impedâncias harmônicas, são aplicadas as leis de Kirchhoff para determinar as tensões harmônicas nas barras de interesse. Isso é feito para cada ordem harmônica separadamente, permitindo calcular as tensões harmônicas em PU.

4. Cálculo das Distorções Harmônicas

Com as tensões harmônicas em PU nas barras, calcula-se o valor eficaz (RMS) das tensões e as distorções harmônicas totais (DHT) em cada barra do sistema. Este processo envolve a soma das contribuições das tensões harmônicas para diferentes ordens e a comparação com a tensão fundamental.

5. Dimensionamento do Filtro Harmônico

Finalmente, com base nas análises das distorções e nas condições de ressonância do sistema, um filtro harmônico amortecido de 1ª ordem, como é mostrado na Figura 2 é projetado para atenuar as distorções e evitar ressonâncias paralelas em ordens harmônicas específicas. Este filtro será incorporado ao sistema para garantir que as distorções harmônicas permaneçam dentro dos limites aceitáveis, conforme estabelecido pelas normas regulatórias.

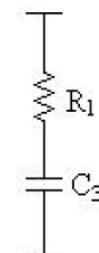


Figura 2 – Filtro amortecido de 1ª ordem.

Resultados e discussão

O sistema elétrico fictício analisado presente na Figura (1) foi parametrizado para investigar a distorção harmônica e o risco de ressonância no sistema. A concessionária foi representada com uma potência de curto-circuito de 100 MVA e uma relação X/R de 10. O transformador, por sua vez, apresentou uma impedância percentual de 5,75%, com uma potência de 500 kVA e tensões nominais de 13,2 kV e 380 V. A carga motora, considerada linear, possui uma potência de 90 kW e um fator de potência de 0,60 indutivo, enquanto a carga não linear foi modelada com uma potência aparente de 150 kVA e fator de potência de 0,92.

Para a correção do fator de potência da carga motora para 0,95, foi necessário calcular a potência reativa do motor, resultando em um valor de 120 kVAr. A potência do banco de capacitores calculada para essa correção foi de 90,43 kVAr. Além disso, calculou-se a potência de curto-circuito na barra BT, resultando em um valor de 8,695 MVA, e a ordem harmônica de ressonância paralela foi identificada em aproximadamente 10ª ordem, correspondente a uma frequência de ressonância de 600 Hz. Para determinar as impedâncias dos componentes do sistema, foram aplicados os parâmetros de tensão e potência para cada elemento, obtendo-se, por exemplo, a impedância da concessionária em 1,742 Ω , da carga linear em 0,963 Ω , do transformador em 0,0166 Ω e do capacitor em 11,596 Ω .

No sistema por unidade (PU), adotou-se uma base de potência de 100 MVA, e as impedâncias foram normalizadas de acordo com os valores base. A concessionária apresentou uma impedância em PU de 1, o transformador de 11,501 PU, a carga linear de 83,342 PU e o capacitor de 1105,26 PU. Os ângulos de impedância também foram calculados, por meios das relações X/R de cada elemento, permitindo a obtenção dos componentes resistivos e reativos.

No que diz respeito à carga não linear (CNL1), a corrente foi calculada em 227,9 A, e a corrente em PU foi de aproximadamente $1,5 \times 10^{-3}$ PU. Com base na corrente fundamental da CNL1, calcularam-se as correntes harmônicas nas ordens de 5ª, 7ª, 11ª e 13ª, cujos valores em PU estão mostrados na Tabela 2.

Tabela 2 – Valores da corrente em relação a corrente base

ORDEM HARMÔNICA (h)	CORRENTE % de In
5	19,2
7	13,2
11	7,3

13

5,7

A impedância harmônica dos componentes foi determinada para cada ordem harmônica, conforme apresenta as Tabelas 3 a 6.

Tabela 3 – Valores das impedâncias da concessionária em cada uma das ordens harmônicas.

h	Concessionária (Ω)
1	0,0995 + j0,9995
5	0,222 + j4,988
7	0,263 + j6,997
11	0,33 + j10,995
13	0,359 + j12,944

Tabela 4 – Valores das impedâncias do transformador em cada uma das ordens harmônicas.

h	Transformador (Ω)
1	2,39 + j11,25
5	26,271 + j56,25
7	44,263 + j78,75
11	87,194 + j123,75
13	112,024 + j146,25

Tabela 5 – Valores das impedâncias da carga motora em cada uma das ordens harmônicas.

h	Carga CL1 (Motor de Indução)
1	10,336 + j83,699
5	14,47 + j413,495
7	16,538 + j578,893
11	20,672 + j909,689
13	22,739 + j1075,087

Tabela 6 – Valores das impedâncias do capacitor em cada uma das ordens harmônicas.

h	Capacitor
1	-j1111,11
5	-j222,222
7	-j158,730
11	-j101,010
13	-j85,470

As tensões harmônicas geradas nas barras BUSMT e BUST1 foram então calculadas, sendo, para a 5ª ordem, 0,00164 PU e 0,02198 PU, respectivamente. As distorções harmônicas totais (DHTs) das barras foram determinadas, com valores de 0,3196% para a BUSMT e 4,4655% para a BUST1.

A análise desses valores demonstrou que, embora as DHTs estivessem dentro dos limites permitidos, a ressonância na 10ª ordem representava um risco que precisava ser tratado. Os cálculos realizados para determinar a potência ativa dissipada no resistor R_1 evidenciaram a relação direta entre a resistência e a eficiência da filtragem das correntes harmônicas, conforme apresenta as Tabelas 7 e 8.

Tabela 7: Valores de potência dissipada em Watts no resistor R_1 para as respectivas combinações estabelecidas

R_1	X_{C3}		
	1 Ω	0,5 Ω	0,1 Ω
1 Ω	1198,278 W	1262,948 W	1297,790 W
0,5 Ω	1798,709 W	1944,800 W	2109,205 W
0,1 Ω	2325,571 W	2832,413 W	3341,929 W

Tabela 8: Valores de DHTs na barra BUST1 para as respectivas combinações estabelecidas

R_1	X_{C3}		
	1 Ω	0,5 Ω	0,1 Ω
1 Ω	3,947%	3,925%	3,911%
0,5 Ω	3,610%	3,521%	3,466%
0,1 Ω	3,467%	2,577%	1,834%

Conforme mostrado nas Tabelas 7 e 8, para valores menores de resistência, como $R_1=0,1 \Omega$, observou-se uma filtragem mais eficiente, especialmente para as ordens harmônicas superiores, como a 7ª, 11ª e 13ª. No entanto, essa eficiência de filtragem tem um custo elevado: a potência dissipada no resistor aumenta significativamente à medida que a resistência diminui, ultrapassando 3340 W na combinação de $R_1=0,1 \Omega$ e $X_C=0,1 \Omega$. Isso torna essa configuração inviável do ponto de vista de dissipação de calor e eficiência energética, exigindo um design robusto e caro para o filtro.

Por outro lado, as combinações com resistências maiores, como $R_1=1 \Omega$ e $R_1=0,5 \Omega$, apresentam uma dissipação de potência consideravelmente mais baixa, com valores de até 1262 W e 1944 W, respectivamente. No entanto, essas configurações não são tão eficazes na filtragem das correntes harmônicas, especialmente nas ordens mais baixas, como a 5ª. Dessa forma, a configuração ideal envolve um equilíbrio entre a eficiência da filtragem e a potência dissipada. Apesar de valores mais baixos de resistência serem atraentes para melhorar a filtragem, a elevada potência dissipada torna a implementação prática desses filtros um desafio,

exigindo um ajuste fino entre os componentes do circuito para evitar superaquecimento e sobrecarga de potência.

Conclusões

Assim, esta pesquisa teve como objetivo estudar e analisar as funcionalidades dos filtros harmônicos amortecidos de 1ª ordem. Os resultados mostraram que a redução da resistência e da reatância capacitiva do filtro aumenta a eficiência da filtragem. Desse modo, conclui-se que os filtros harmônicos amortecidos são eficazes para atenuar os problemas relacionados a harmônicas, bem como para reduzir os impactos de ressonâncias na rede elétrica. No sistema analisado, que apresenta uma frequência de ressonância na 10ª ordem, observou-se que o risco de sobretensão causado por uma ressonância paralela pode ser significativamente minimizado ao filtrar as harmônicas de 11ª ordem.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer a UNIFEI pela oportunidade apresentada e ao professor orientador, pelos ensinamentos passados através desta pesquisa.

Referências

- ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica). Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST: Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica. [S.l.]: ANEEL, [s.d.].
- NASCIMENTO, Rogério Pinto. Regras e Procedimentos de Distribuição. Uberlândia: Regras e Procedimentos de Distribuição, 2007.
- SANTOS, Laylla Celeste Das Graças. MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO ACIONADO POR INVERSOR DE FREQUÊNCIA: ANÁLISE DO IMPACTO DA VELOCIDADE DE OPERAÇÃO DO MOTOR NA DISTORÇÃO HARMÔNICA DE CORRENTE. Itabira: Universidade Federal de Itajuba..
- SOUZA, Arthur Costa de. Impactos dos sistemas fotovoltaicos na rede elétrica associados a qualidade da energia elétrica. Dissertação do programa de pós-graduação da Universidade Federal de Uberlândia – UFU. 2016, Uberlândia -MG.
- SOUZA, Prof. Arthur Costa De. Projeto de Filtros Harmônicos Sintonizados em Rede de Média e Baixa Tensão na Plataforma MatLab/ Simulink. Itabira: Universidade Federal de Itajuba
- TAVARES, Paulo Henrique. Compensação de Reativos e Filtragem de Harmônicos em Sistemas Elétricos de Potência. Campinas, setembro de 2008.