METRÔ - DF	ENGEVIX	CODIFICAÇÃO ENGEVIX P00160_01-5F-MC-701-0A

SETOR	GERAL
ENDEREÇO	FILTRO DE HARMÔNICAS
PROPRIETÁRIO	METRÔ – DF
AUTOR DO PROJETO	IDYLIO THOMAZINNI FILHO / FLÁVIO RESENDE GARCIA
RESPONSÁVEL TÉCNICO	

METRÔ - DF

IDYLIO THOMAZINNI FILHO CREA N° 5060007017

METRÔ - DF

		SISTEMA ENERGIA	
		SUBSISTEMA FILTRO DE HARMÔNICAS	
VISTO ELJ/ RJF	DATA 22/10/2014	LOCAL GERAL	
APROVADO RMP	DATA 10/11/2014	COMPONENTES /TIPO DE DOCUMENTO MEMÓRIA DE CÁLCULO	AREA DE CONST. -
ESCALA S/ESC.	ETAPA DO PROJ. BÁSICO		
N MICROFILME	FOLHA 1/31	CODIFICAÇÃO **MC.4/EX.99/11.701**	REVISÃO **1**

1	**APROVADO CONFORME PARECER 0515/14-TEN**	**10/11/14**	**FRG**	**ECoA**	**ITF**	**ELJ/RJF**	**RMP**
0	EMISSÃO INICIAL	22/10/14	FRG	ECoA	ITF	ELJ/RJF	RMP
N°	MODIFICAÇÃO	DATA	FEITO	VISTO	APROV.	VERIF.	APROV
		CONTRATADA				**METRÔ - DF**	
R E V I S Õ E S							

METRÔ DF
MC.4/EX.99/11.701

FILTRO DE HARMÔNICAS

SISTEMA DE ENERGIA
PROJETO BÁSICO

Sumário

1 INTRODUÇÃO 6

2 DEFINIÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DOS FILTROS DE HARMÔNICOS 6

2.1 FILTROS PASSIVOS SINTONIZADOS 7

2.2 FILTROS PASSIVOS AMORTECIDOS 12

3 PROCEDIMENTO BÁSICO DE CÁLCULO DE FILTROS HARMÔNICOS 19

3.1 PEE/SAM: Cálculo da Capacitância e Indutância dos Filtros de 5ª, 7ª e 11ª Harmônica 21

3.2 PEE/CEI: Cálculo da Capacitância e Indutância dos Filtros de 5ª, 7ª e 11ª Harmônica 22

3.3 PEE/ANR: Cálculo da Capacitância e Indutância dos Filtros de 5ª, 7ª e 11ª Harmônica 23

3.4 SE Brasília Centro: Cálculo da Capacitância e Indutância dos Filtros de 5ª, 7ª e 11ª Harmônica 24

3.5 Águas Claras: Cálculo da Capacitância e Indutância dos Filtros de 5ª, 7ª e 11ª Harmônica 25

3.6 SE Ceilândia Sul: Cálculo da Capacitância e Indutância dos Filtros de 5ª, 7ª e 11ª Harmônica 26

3.7 PEE Hípica: Cálculo da Capacitância e Indutância dos Filtros de 5ª, 7ª e 11ª Harmônica 28

4 DIMENSIONAMENTO DOS CABOS DO DISJUNTOR GERAL ATÉ O BARRAMENTO DE ENTRADA DO FILTRO DE TRIPLA SINTONIA: PEE/SAM, PEE/CEI E PEE/ANR 29

5 DIMENSIONAMENTO DOS CABOS DO DISJUNTOR GERAL ATÉ O BARRAMENTO DE ENTRADA DO FILTRO DE TRIPLA SINTONIA: SE SO, SE AC, SE BC E PEE/HIP 30

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama de um circuito RLC série (filtro)..... 7

Figura 2 – Impedância de um circuito RLC série versus frequência..... 9

Figura 3 – Ângulo em função da frequência. 9

Figura 4 – Filtros amortecidos: (a) 1ª Ordem (b) 2ª Ordem (c) 3ª Ordem (d) Tipo "C". 12

Figura 5 – Magnitudes da impedância do filtro amortecido de 2ª ordem versus frequência, para diferentes valores de "d”..... 15

Figura 6 – Magnitudes da impedância do filtro amortecido de 3ª ordem versus frequência, para diferentes valores de "d". 16

Figura 7 – Correntes máximas de curto-circuito no condutor. 30

Figura 8 – Correntes máximas de curto-circuito no condutor. 31

1 INTRODUÇÃO

Diante do crescente emprego das cargas elétricas especiais (também denominadas de fontes harmônicas), e dos efeitos prejudiciais dos harmônicos para as instalações elétricas em geral, impõe-se a necessidade de adotar medidas de controle e redução dos níveis de “poluição” harmônica nessas instalações. Dentre as medidas possíveis, uma das mais eficazes e importantes consiste da instalação de filtros harmônicos em derivação nos circuitos de potência.

O objetivo fundamental de um filtro harmônico consiste em reduzir a amplitude de uma ou mais correntes ou tensões harmônicas, em uma determinada parte do sistema. Todavia, já que as instalações que apresentam problemas de perturbações harmônicas normalmente também necessitam de compensação reativa, os filtros, conectados em paralelo com o sistema e próximos às fontes harmônicas, poderão também servir à tarefa adicional de prover potência reativa a frequência fundamental. Isto significa que dois aspectos se entrelaçam na determinação de filtros harmônicos: o desempenho de filtragem e a compensação reativa.

Quanto à filtragem, as correntes oriundas das cargas especiais fluirão para o interior dos filtros e também penetrarão o sistema CA, em magnitudes que dependerão da relação entre suas respectivas admitâncias, para as frequências consideradas. O padrão desejado da admitância do circuito de filtragem pode ser obtido através da apropriada combinação de elementos capacitivos, indutivos e resistivos, formando, por exemplo, braços de filtros sintonizados ou amortecidos, em combinações variadas.

2 DEFINIÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DOS FILTROS DE HARMÔNICOS

Filtros são circuitos capazes de separar sinais elétricos (correntes e tensões), alterando as características de amplitude e fase desses sinais. Este processo de separação dos sinais elétricos ou, simplesmente, filtragem, ocorre graças às diversas características das curvas de impedância dos diferentes filtros com relação ao espectro de frequências.

Desse modo, de acordo com o tipo de filtro, a finalidade de filtragem e a característica de frequência do filtro empregado, rejeitam-se sinais de frequências indesejáveis ou, contrariamente, deixam-nos passar.

Os filtros são primordialmente classificados conforme suas características de impedância com a frequência. Assim, estes filtros podem ser agrupados em duas categorias, a saber:

I) Filtros sintonizados.

II) Filtros amortecidos.

Os filtros sintonizados são circuitos ressonantes formados por elementos R, L e C em série ou combinações série-paralela destes elementos de circuito. Nestes filtros, os elementos capacitivos e indutivos são escolhidos de modo que os circuitos apresentem uma, duas ou três frequências de ressonância.

Os filtros amortecidos são circuitos formados por capacitores, indutores e resistores em diversas combinações. São circuitos capacitivos à frequência fundamental, como os filtros

sintonizados, e apresentam baixa impedância predominantemente resistiva, para frequência, denominada frequência de sintonia.

2.1 FILTROS PASSIVOS SINTONIZADOS

Os filtros sintonizados são circuitos ressonantes série que, na frequência de sintonia ou de ressonância, apresentam baixa impedância resistiva. Para frequências menores que a frequência de sintonia são capacitivos, e para as frequências superiores àquela frequência são indutivos. Portanto, para a frequência fundamental, estes filtros podem funcionar como compensadores de reativo.

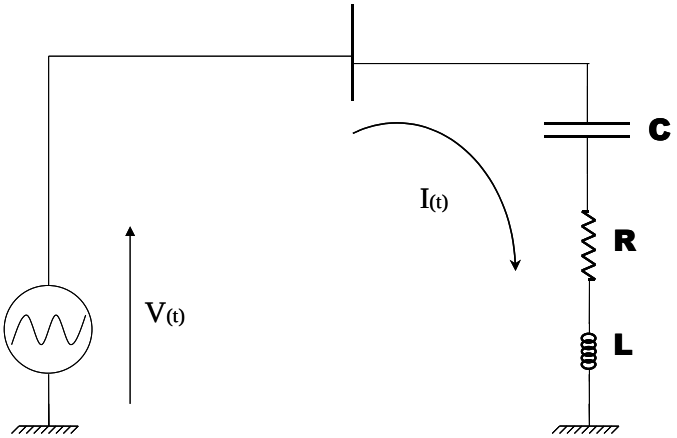


Figura 1 – Diagrama de um circuito RLC série (filtro)

Apesar da definição de ressonância série em capítulo anterior, esta será revista do ponto de vista de filtro. Pode-se dizer que a ressonância série é uma condição na qual um circuito contendo pelo menos um indutor e um capacitor apresentará uma impedância de entrada puramente resistiva.

Consequentemente, aplicando-se este conceito ao circuito série da Figura 1, cuja impedância complexa é dada pela equação 1, observa-se que, ajustando-se a frequência da fonte, existirá um valor de frequência em que esta impedância será puramente resistiva.

$$Z(w) = R + j.[w.L - \frac{1}{w.C}] \qquad [1]$$

Onde, w é a frequência angular da fonte de alimentação, e R, L e C são os valores dos componentes indicados na Figura 1.

A condição de ressonância, conforme estabelecida acima, aplicada à equação 1 possibilitará a determinação da frequência que anulará a parte imaginária de Z(w):

$$[w.L - \frac{1}{wC}] = 0 \qquad [2]$$

Assim, explicitando-se a frequência w na equação 2 obtém-se a frequência angular de ressonância do circuito série, que é dada por:

$$w_o = \frac{1}{\sqrt{L.c}} = 2.\pi.f_o = \frac{2.\pi}{T_o} \qquad [3]$$

Onde, w_O é a frequência angular de ressonância do circuito RLC.

Observa-se na equação 3 que w_O é função, apenas, dos componentes L e C do circuito. Portanto, esta frequência (w_O) é uma característica do circuito RLC série. Isto significa que, se a fonte de alimentação (de pulsação w variável) coincidir sua frequência com a frequência w_O própria do circuito, o fará entrar em ressonância série. Procurando então ilustrar, graficamente, as condições de ressonância série, serão tomados o módulo e o ângulo de fase da impedância do circuito da Figura 1, conforme indicam as equações 4 e 5:

$$Z(w) = \sqrt{R^2 + [w.L - \frac{1}{w.C}]^2} \qquad [4]$$

$$\phi(w) = tg^{-1}[\frac{w.L - 1/w.C}{R}] \qquad [5]$$

Onde:

Z(w): É o módulo da impedância complexa dada por (1), em função da frequência w;

φ(w): É o ângulo da impedância Z(w), em função de w. Este ângulo difere de φ, apenas, pelo sinal oposto, tomando-se na referência a tensão da fonte dada por 6.

$$V(t) = \sqrt{2}V\cos(wt) \qquad [6]$$

As representações gráficas das equações 4 e 5, respectivamente, estão ilustradas nas, para um dado circuito RLC série de resistência R = 1 Ω, capacitância C= 100 μF e indutância L = 10 mH, cuja frequência angular ressonante (w_O) é 1000 rad/s.

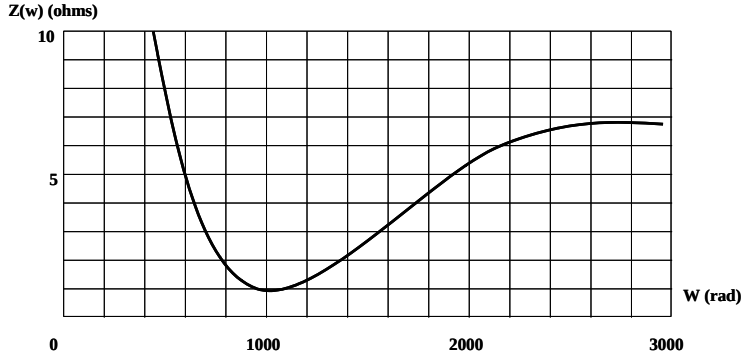


Figura 2 – Impedância de um circuito RLC série versus frequência.

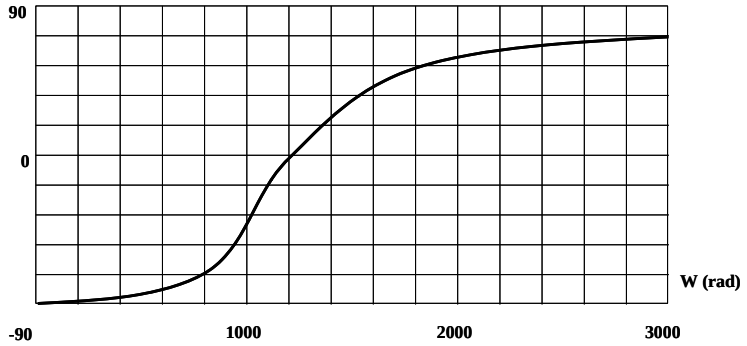


Figura 3 – Ângulo em função da frequência.

Pela observação da Figura 2 verifica-se que, na frequência de ressonância, a impedância é mínima. Verifica-se também que o módulo de Z(w) aumenta indefinidamente quando w tende para zero ou infinito. Por outro lado, da Figura 3, conclui-se que o ângulo de Z(w) anula-se para w = w_O. Este fato demonstra que, na ressonância série, o circuito será puramente resistivo. Observa-se também que aumentando a frequência além do w_O, os ângulos da impedância serão positivos e cada vez mais próximos de +90º. Isto implicará que a impedância será predominantemente indutiva nas altas frequências. Inversamente, para frequências baixas e inferiores a frequência de ressonância, o circuito será predominantemente capacitivo.

Uma outra forma de ilustrar a ressonância série consiste em analisar o módulo da corrente elétrica que atravessa os elementos R, L e C. Considerando-se, então, o circuito da figura 1, sua corrente será dada em função da frequência w, para uma tensão de alimentação de amplitude constante, conforme indica a relação 7.

$$I(w) = \frac{V(w)}{\sqrt{R^2 + (w.L - 1/w.C)^2}} = V(w).Y(w) \qquad [7]$$

Onde:

I(w) e V(w): São, respectivamente, os módulos da corrente e da tensão de alimentação, em função de w;

Y(w): É o módulo da admitância do circuito RLC série, que equivale ao inverso de Z(w).

1. Comportamento da Energia

O circuito RLC série, conforme ilustrado na figura é composto de elementos que armazenam a energia elétrica (capacitor e indutor) e um elemento que dissipa essa energia sob a forma de calor (resistor).

Por conseguinte, é útil avaliar estas energias quando da condição de ressonância, sendo que elas poderão trazer informações importantes sobre o funcionamento do circuito.

A energia armazenada no capacitor é dada pela equação 8:

$$W_C(t) = \frac{1}{2}.C.v_C^2(t) = \frac{I^2}{w_o^2.C}.\cos^2(w_o.t - 90°) \qquad [8]$$

Já no indutor, a energia armazenada é dada pela equação 9.

$$W_L(t) = \frac{1}{2}.L.i_L^2(t) = L.I^2.\cos^2(w_o.t) \qquad [9]$$

A energia total instantânea armazenada é, portanto, constante e este valor é também o valor máximo, conforme indica a equação 10.

$$W(t) = W_L(t) + W_C(t) = L.I^2 = \frac{1}{w_o^2.C}.I^2 \qquad [10]$$

Por outro lado, a energia perdida no resistor, durante um período, será obtida multiplicando-se a potência média no resistor pelo período correspondente à condição de ressonância:

$$W_{dissipada} = p_{dissipada}.T_o = R.I^2.\frac{2.\pi}{w_o} \qquad [11]$$

Onde, w_O é a frequência angular de ressonância definida pela equação 3.

Considerando-se os dois aspectos de um circuito ressonante, que são: (1) - a máxima energia que é capaz de armazenar e; (2) - as perdas elétricas de energia apresentadas, verifica-se, experimentalmente, que o "afunilamento" ou o pronunciamento das suas curvas de resposta (corrente, impedância, ou admitância versus frequência) será determinado pela relação dessas grandezas. Desta constatação resulta a definição de um parâmetro muito importante, denominado fator de qualidade, o qual será descrito a seguir.

2. Fator de Qualidade

O fator de qualidade é um parâmetro adimensional definido (tanto para circuitos como para componentes) através da relação entre a máxima energia armazenada e a energia total dissipada por período. Assim, designando-se tal parâmetro pelo símbolo Q, sua definição, conforme a referência é dada por 12:

$$Q = 2.\pi.[\frac{máximaenergiaarmazenadanocircuito}{energiatotaldissipadaporperíodo}] \qquad [12]$$

O fator Q, conforme será demonstrado significa uma medida de grau de pronunciamento das curvas de resposta dos circuitos ressonantes.

Consequentemente, dada à importância do fator de qualidade no estudo de filtros, a partir da definição 12, serão obtidas relações úteis que envolvem a frequência de ressonância e os parâmetros do circuito. Considerando-se, então, o circuito ressonante série da figura 1 e as deduções feitas sobre energia (armazenada e dissipada), pode-se expressar o fator de qualidade, à frequência de ressonância (w_O), em função dos valores dos componentes, conforme mostra a equação 13.

$$Q = \frac{Z_o}{R} = \frac{\sqrt{L/C}}{R} \qquad [13]$$

Onde:

Q = Fator de qualidade

Zo = Impedância natural do sistema

L, C e R = Elementos do filtro.

Entretanto, vale ressaltar que é comum referir-se a fatores de qualidade de reatores, ou de capacitores, como elementos isolados, sendo, portanto outra equação.

O fator de qualidade dos filtros sintonizados também pode ser visto com uma medida do grau de seletividade desses circuitos, quanto às frequências harmônicas. Quanto maior for o fator Q mais seletivo será o filtro, ou seja, ele impedirá cada vez mais a absorção das correntes harmônicas de frequências diferentes daquela de sintonia.

3. Dessintonia

Variações de frequência ocorrem em qualquer sistema elétrico devido às pequenas modificações de carga e geração. Nos sistemas elétricos reais, variações da ordem de ± 0,15 Hz podem ser observadas.

Os filtros sintonizados, em especial, são sensíveis a estas variações que ocorrem na frequência do sistema elétrico, como também a quaisquer outros fatores que tenham alguma influência sobre os valores dos seus componentes. Assim, se um filtro sintonizado é dimensionado para ter uma impedância mínima para uma dada frequência, três fatores independentes contribuem para dessintonizar o circuito para a harmônica correspondente:

a) variação da frequência do sistema c.a;

b) erro de sintonia inicial, devido ao degrau mínimo de sintonia do reator do filtro, dada à própria característica discreta de seus enrolamentos, e também devido aos erros inerentes à medição;

c) variação da capacitância total, devido à variação da temperatura, ou devido à falha de um ou mais elementos de capacitor, bem como variações entre o valor projetado com o valor obtido após a fabricação (tipicamente entre +2,5% à +7,5 %).

Pode-se também calcular o desvio equivalente de frequência (dessintonia) pela relação 14.

$$\delta = \frac{w - w_o}{w_o} \qquad [14]$$

2.2 FILTROS PASSIVOS AMORTECIDOS

Os filtros amortecidos são circuitos formados por elementos R, L e C, em diferentes combinações, que oferecem baixa impedância sobre uma larga faixa de frequência. Estes circuitos, quando são empregados para filtrar correntes de ordens harmônicas elevadas são denotados por filtros passa - alta.

Na frequência fundamental, a exemplo dos filtros sintonizados, os filtros amortecidos também apresentam impedância predominantemente capacitiva. Já nas frequências superiores, eles são essencialmente resistivos.

Os modelos dos filtros amortecidos são basicamente de quatro tipos: os filtros amortecidos de primeira, segunda e terceira ordens, e o filtro tipo "C". Estes modelos estão ilustrados na Figura 4.

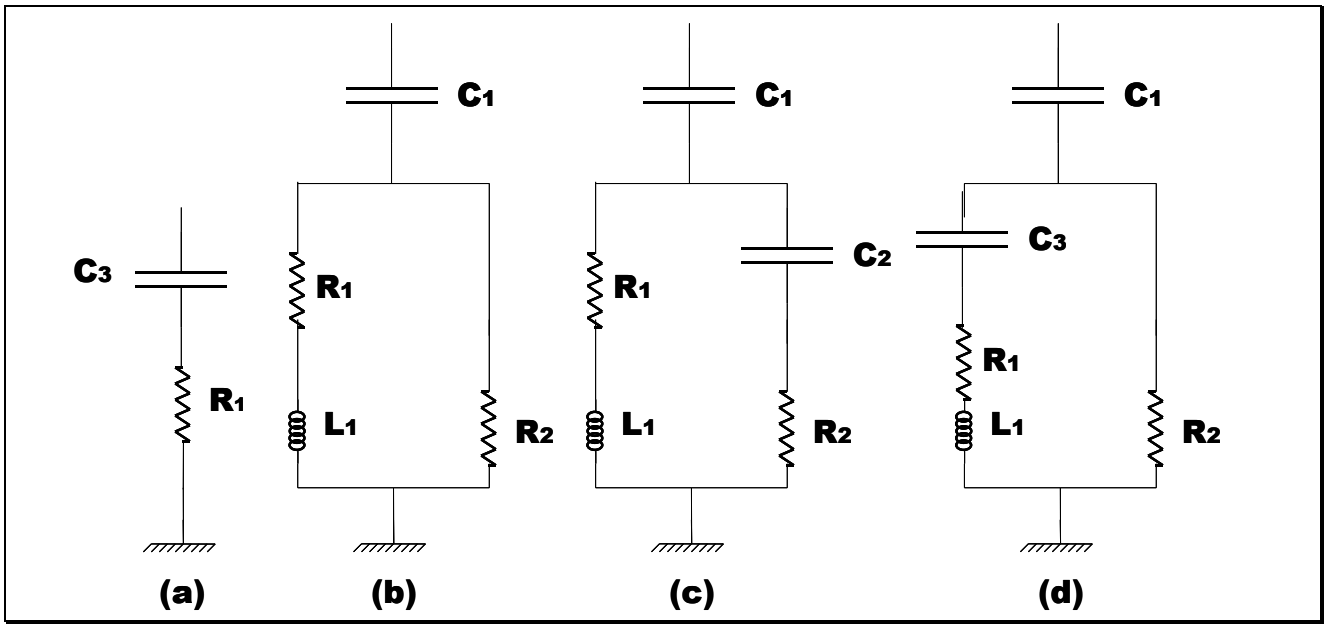


Figura 4 – Filtros amortecidos: (a) 1ª Ordem (b) 2ª Ordem (c) 3ª Ordem (d) Tipo "C".

Dentre os filtros amortecidos, o de 1ª ordem, ilustrado na Figura 4a, não é utilizado em aplicações práticas por requerer um grande capacitor e por apresentar excessivas perdas de energia à frequência fundamental. Já os demais filtros amortecidos são largamente utilizados nos sistemas elétricos, e a escolha entre os modelos prende-se aos requisitos de desempenho de filtragem e de perdas de energia.

Por conseguinte, dada à diversidade de modelos de filtros amortecidos e em consideração às peculiaridades de cada modelo, notadamente, no que se referem aos parâmetros característicos, eles serão, então, analisados separadamente.

4. Filtro Amortecido de 2ª Ordem

Inicialmente, definem-se as grandezas frequência característica, impedância natural e fator de amortecimento, conforme indicam as equações 15, 16 e 17:

- ✓ frequência característica:

$$w_o = \frac{1}{\sqrt{L_1 \cdot C_1}} \qquad [15]$$

- ✓ impedância natural:

$$Z_o = \sqrt{\frac{L_1}{C_1}} = w_o \cdot L_1 = \frac{I}{w_o \cdot C_1} \qquad [16]$$

- ✓ fator de amortecimento:

$$d = \frac{R_2}{Z_o} \qquad [17]$$

A impedância complexa do filtro amortecido de 2ª ordem, para uma frequência w genérica, foi calculada com base nas grandezas características já definidas, desprezando-se a resistência R1. O componente R1, nesta fase do estudo, será desprezado para propiciar a interpretação do significado das grandezas Wo, Zo e d, anteriormente definidas. Tendo em vista também que R1 (a qual geralmente corresponde à resistência própria do reator L1) normalmente possui valor relativamente baixo.

Assim, sendo a equação 18 expressa **Z**f(w) em função de Wo, Z_O e d.

$$Z_f(w) = Z_o \cdot \{ \frac{d + j.(\frac{1}{x}).[d^2 - 1 - (\frac{d}{x})^2]}{1 + (\frac{d}{x})^2} \} \qquad [18]$$

Onde:

$$X = \frac{w_o}{w} \qquad [19]$$

Sendo assim, com base nas grandezas características do filtro amortecido de 2ª ordem, e nas suas expressões de impedância como função da frequência harmônica (equação 18), poder-se-á extrair as propriedades básicas deste tipo de filtro, como também esboçar sua curva característica de impedância versus frequência.

Em primeiro lugar, verifica-se da equação 18 que, para "d" fixo, à medida que a frequência aumenta (ou seja, para valores elevados de "x"), a impedância do filtro tenderá ao valor (Zo x d), que equivale a R2. Este efeito será mais ou menos acentuado dependendo do valor do parâmetro "d".

Já para as ordens harmônicas baixas e, principalmente, à frequência fundamental (ou seja, valores reduzidos de "x"), o filtro de 2ª ordem será predominantemente capacitivo, independentemente do valor de "d".

Assim, de acordo com o que está indicado nas relações 20, 21 e 22, admitindo-se exclusivamente d > 1, ter-se-á comportamento capacitivo, resistivo ou indutivo para este tipo de filtro.

$$w < w_o \cdot \sqrt{\frac{d^2}{d^2 - 1}} \rightarrow Z_f(w) capacitiva \qquad [20]$$

$$w = w_o \cdot \sqrt{\frac{d^2}{d^2 - 1}} \rightarrow Z_f(w) resistiva \qquad [21]$$

$$w > w_o \cdot \sqrt{\frac{d^2}{d^2 - 1}} \rightarrow Z_f(w) indutiva \qquad [22]$$

No caso contrário, isto é, para valores de "d" menores ou iguais à unidade (d=1), o filtro será sempre capacitivo, independentemente da frequência.

Finalmente, a partir dessas considerações, pode-se representar graficamente a magnitude da impedância do filtro amortecido de 2ª ordem como função da frequência, conforme ilustra a figura 5.

Diante do exposto, conclui-se que o filtro amortecido de 2ª ordem tem sua característica em função da frequência, efetivamente, governada pelos parâmetros d, w_O e Zo. Isto significa que, definindo-se convenientemente os valores desses parâmetros, poder-se-á obter um filtro capacitivo à frequência fundamental, e que, simultaneamente, ofereça impedâncias suficientemente baixas (tendendo ao valor de R2) para as frequências maiores do que uma dada frequência escolhida.

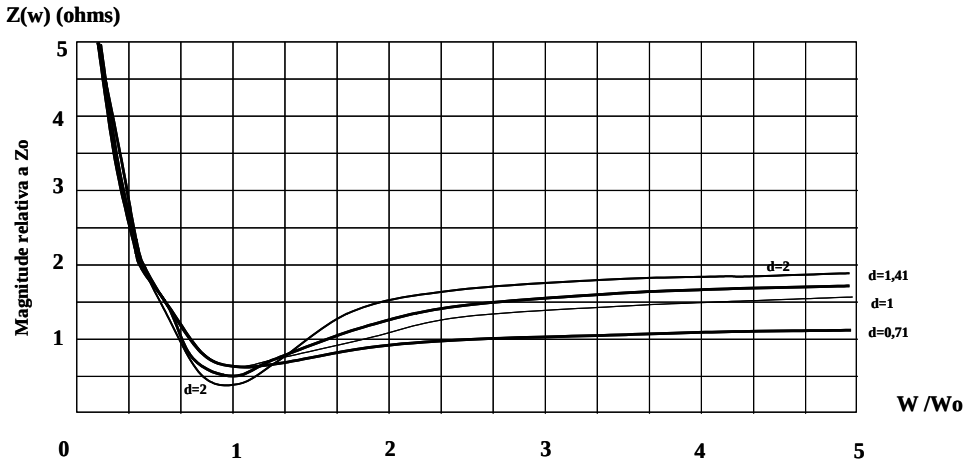


Figura 5 – Magnitudes da impedância do filtro amortecido de 2ª ordem versus frequência, para diferentes valores de "d".

5. Filtro Amortecido de 3ª Ordem

Baseando-se no circuito da figura 4.c, e desprezando-se a resistência R1, definem-se as grandezas características do filtro amortecido de 3ª ordem, para o caso particular em que C1 = C2, de maneira similar às equações 15, 16 e 17.

Ressalta-se que, a condição C1 = C2 será destacada porque a consideração de C1= C2 implicaria na existência de duas frequências características distintas, conforme será discutido posteriormente. Além disso, os filtros amortecidos de 3ª ordem usualmente empregados em sistemas de filtragem possuem C1 = C2.

Consequentemente, procedendo-se de modo análogo ao caso do filtro de 2ª ordem, obtém-se a equação 23. Esta equação fornece a impedância do filtro de 3ª ordem em termos de frequência w e dos seus parâmetros característicos.

$$Z_f(w) = Z_o.[\frac{1}{j.x}+(\frac{1}{d+\frac{1}{j.x}}+\frac{1}{j.x})^{-1}] \qquad [23]$$

Onde, "x" é a variável definida anteriormente através da relação [19]

Da equação 23, tomando-se o limite de **Z**F(w) quando "x" tende a valores muito altos, verifica-se que a impedância do filtro convergirá para o valor (Zo x d) que equivale a R2, em conformidade com a equação 17. Contrariamente, para valores muito reduzidos de "x", ou seja, para frequências baixas e inferiores à frequência w_O ter-se-á uma elevada impedância.

Além disso, ainda com base na equação 23 verifica-se que, para a frequência harmônica coincidente com a frequência característica (w_O), o filtro de 3ª ordem apresentará impedância puramente resistiva, independentemente do valor do parâmetro "d". Desse modo, nesta frequência ($w = w_O$), o valor da impedância do filtro será dado pela equação 24, obtida da substituição de x=1 em 23.

$$Z_f(w = w_o) = \frac{Z_o}{d} \text{ (para qualquer 'd')} \qquad [24]$$

Assim, com base na equação 23, as curvas de magnitude da impedância deste tipo de filtro, em função da frequência, para diversos valores do fator de amortecimento (d), como ilustra a figura 6.

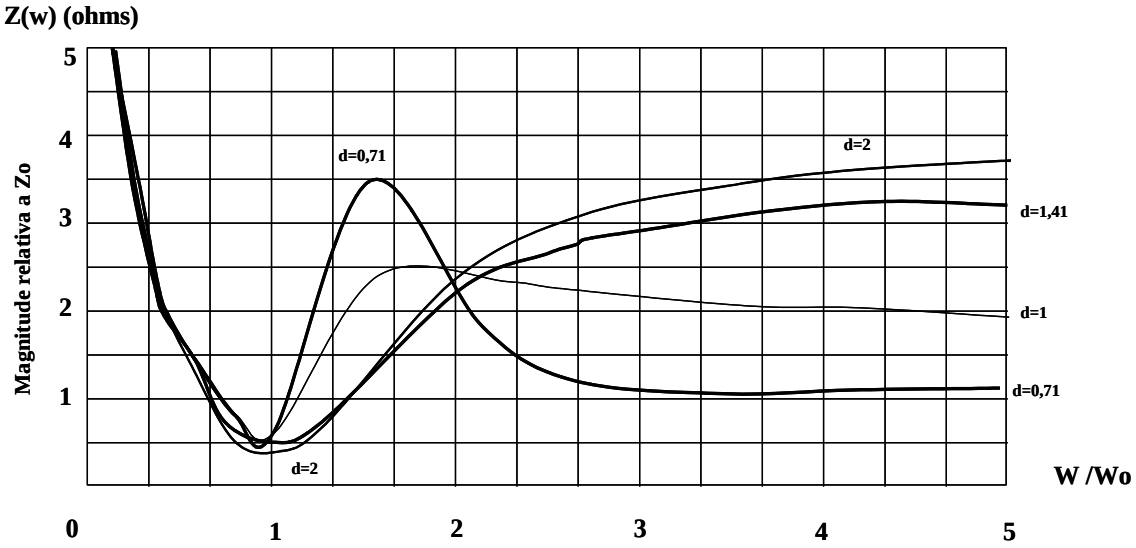


Figura 6 – Magnitudes da impedância do filtro amortecido de 3ª ordem versus frequência, para diferentes valores de "d".

Neste ponto, ressalta-se que o fator de amortecimento (d), definido para os filtros amortecidos, e o fator de qualidade (Q) dos filtros sintonizados guarda uma relação de semelhança pelo menos no que se refere ao significado físico (apesar de serem definidos por expressões inversas).

Nos filtros sintonizados, como foi demonstrado, quanto menor for a resistência (que fica em série com o indutor ou do próprio indutor) mais seletivo será o circuito. Já para os filtros amortecidos, por causa do resistor em paralelo com o indutor (no caso, R2), quanto mais alto for R2 mais "aguda" será a sintonia do circuito. Isto é, em ambos os casos estes parâmetros (d e Q) representam a seletividade dos filtros. No entanto, para o filtro de 3ª ordem, embora a definição adotada para "d" seja a mesma do filtro de 2ª ordem, o efeito

do aumento deste fator será o de intensificar a ressonância, e também tornar a anti-ressonância mais acentuada.

Regra geral, o filtro amortecido de 3ª ordem apresenta duas frequências características. Todavia, essas duas frequências serão distintas exclusivamente no caso em que C1 diferente de C2. Neste caso, entre essas duas frequências, a impedância harmônica do filtro será indutiva.

Em qualquer outra parte do espectro a impedância será capacitiva. Por outro lado, à medida que o valor da capacitância C2 se aproxima do valor de C1, o trecho indutivo da impedância tende a desaparecer até que, quando C1 = C2, somente uma frequência característica existirá, tal como foi estudado a partir da equação 23. Nesta situação, a impedância será capacitiva sobre uma larga faixa de frequência, inclusive próximo à frequência característica. Esta situação corresponde ao arranjo mais conveniente, por isso, é o mais enfocado nos estudos.

6. Filtro Amortecido Tipo "C"

O filtro tipo "C" difere dos outros filtros amortecidos por apresentar o ramo RLC série (constituído pelos elementos C3, L1 e R1, indicados na figura 4 sintonizado à frequência fundamental. Isto implicará que, em condições normais, para esta frequência o ramo RLC sintonizado apresentará uma impedância resistiva de valor R1, que, em vista do alto fator de qualidade do circuito ressonante, é normalmente escolhido de valor baixo. Assim a impedância deste filtro será dada, tão somente, pela reatância do capacitor (C1) combinada com o equivalente paralelo de R1 e R2 (Equação 25). Na prática, esta impedância será determinada pela capacitância C1, conforme indica (26).

$$Z_f(w = w_1) = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} - j.\frac{1}{w_1 \cdot C_1} \qquad [25]$$

$$Z_f(w = w_1) = j.\frac{1}{w_1 \cdot C_1} \qquad [26]$$

Esta característica do filtro amortecido tipo "C" implicará que as perdas elétricas resistivas, à frequência fundamental serão menores que aquelas verificadas nos demais filtros amortecidos.

Por outro lado, nas frequências superiores à fundamental, o filtro amortecido tipo "C" terá um comportamento muito parecido com aquele descrito para o filtro de 2ª ordem, tendo em vista a semelhança de seus circuitos. Neste caso, será então possível definir para este tipo de filtro os parâmetros característicos d, Wo e Zo. Do mesmo modo que no caso do filtro de 2ª ordem, à medida que a frequência aumenta, acima da frequência característica, o filtro tipo "C" tenderá a apresentar uma impedância igual a R2.

Em vista do exposto, conclui-se que, todos os filtros amortecidos são predominantemente capacitivos à frequência fundamental, e suas curvas características de impedância variam com a frequência e em função dos parâmetros d, Wo e Zo. Além disso, tais filtros, para as frequências maiores que uma dada frequência de sintonia escolhida (dependente de Wo), oferecerão uma impedância baixa praticamente resistiva, tendendo ao valor R2. Verifica-se também que, nas frequências inferiores àquela escolhida como a de sintonia, a impedância do filtro será relativamente elevada, portanto, absorvendo pouquíssima ou quase nenhuma corrente harmônica.

Todavia, os filtros amortecidos, em geral, apresentam vantagens e desvantagens. A principal vantagem é que esses filtros, durante a operação, não são sensíveis aos desvios de frequência até mesmo para as frequências próximas à de sintonia, exceto o filtro amortecido tipo "C", cujo ramo sintonizado sofrerá a ação da dessintonização. Uma desvantagem dos filtros amortecidos é que, normalmente, tais filtros requerem maior potência reativa fundamental para alcançar o mesmo desempenho de filtragem que se conseguiria com filtros sintonizados de menor capacidade reativa.

3 PROCEDIMENTO BÁSICO DE CÁLCULO DE FILTROS HARMÔNICOS

Demonstra-se a seguir os passos para o projeto de filtros de harmônicos sintonizados ou amortecidos:

a) Definição da necessidade de reativos a ser fornecida por cada filtro em kVAr, obtida via simulação do fluxo de carga, ou seja, as potências reativas utilizadas para o projeto dos filtros de harmônicos se basearam nos estudos de fluxo de carga realizados previamente aos estudos de harmônicos, buscando conciliar a correção do FP com a melhor condição de filtragem harmônica e, também, visando a máxima padronização possível dos equipamentos;

b) Definição tensão nominal rms e da tensão máxima de operação da barra onde o filtro de harmônicos vai ser conectado. Foi adotada a tensão nominal da barra como sendo 13,8 kV para fins de padronização dos componentes a serem fornecidos. Quando a tensão de operação da barra exceder aos 13,8 kV considerados como tensão nominal (por exemplo, 13,9 kV) o equipamento estará preparado para trabalhar com esta tensão e fornecerá mais potência reativa. Quando a tensão de operação da barra estiver abaixo dos 13,8 kV considerados como tensão nominal (por exemplo, 13,4 kV) o equipamento estará preparado para trabalhar com esta tensão e fornecerá menos potência reativa. Estas condições foram previstas nos estudos realizados;

c) Definição da frequência de sintonia a ser adotada para a drenagem da corrente harmônica desejada, obtida através das medições e dos estudos de fluxo de harmônicos.

d) Cálculo da capacitância com base nos itens a, b e c, definidos acima:

$$C = \frac{Q_f}{2 .\pi .f . V_n^2} . \frac{h^2-1}{h^2} \qquad [27]$$

Onde:

Q_f = Potência do Filtro;

V_n = Tensão Nominal do Sistema;

h = Ordem harmônica do filtro

e) Definição da indutância de forma a atender a ressonância série entre o reator e o banco de capacitores na frequência de sintonia escolhida:

$$Fs = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{1}{LC}} \qquad \rightarrow \; L = \frac{1}{(2\pi * Fs)^2 * C} \qquad [28]$$

f) Definição através de programa computacional de fluxo de harmônicos dos seguintes parâmetros:

✓ Fator de Qualidade do reator e do filtro de harmônicos;

30 < FQ < 150 (fator de qualidade do filtro de harmônicos)

$$FQ_R = \frac{X_L}{R_L} \qquad [29]$$

$$FQ_F = \frac{\sqrt{\frac{L}{C}}}{R_L} \qquad [30]$$

Obs: O fator de qualidade do filtro definido é igual a 50.

✓ O Fator de amortecimento para o filtro de 11ª ordem é definido conforme equação abaixo.

$$D = \frac{R_2}{\sqrt{\frac{L}{C}}} \qquad [31]$$

✓ Máxima dessintonia permitida para ajuste da proteção de desbalanço do equipamento, em valores percentuais de perda de capacitância, definidas pelo fornecedor do filtro de harmônicos;

✓ Conteúdo harmônico máximo a ser drenado pelo filtro de harmônicos, após a simulação computacional. Para os 20 anos previstos de operação dos filtros foi definido o conteúdo harmônico máximo igual 120% de In. aa CEB deverá providenciar filtros para a drenagem destas correntes harmônicas crescentes devido o aumento anual das suas cargas elétricas.

✓ Definição da tensão fase-fase máxima a ser suportada e da potência total do filtro pelos critérios de tensão máxima e ampacidade, em regime permanente:

$$V_{RMS} = \sum_{V_h=1}^{h\to 51} V_h \qquad [32]$$

$$I_{RMS} = \sqrt{\sum_{V_h=1}^{h\to 51} I_h^2} \qquad [33]$$

✓ Em caso de filtro amortecido, escolha do tipo de filtro para definição dos componentes (capacitores, reatores e resistores) bem como do fator de amortecimento desejado.

3.1 PEE/SAM: Cálculo da Capacitância e Indutância dos Filtros de 5ª, 7ª e 11ª Harmônica

Filtro de 5ª Harmônica

Portanto, para o filtro de 5ª ordem harmônica (fs = 264Hz), potência de 915 kVAr e tensão nominal de 13,8kV a capacitância será:

$$C = 12{,}09\mu F$$

Pela equação 28, o indutor do reator será:

$$L = 30{,}05mH$$

O valor da resistência do indutor é obtido a partir da equação (30).

$$R_L = 0{,}99\,\Omega$$

Filtro de 7ª Harmônica

Portanto, para o filtro de 7ª ordem harmônica (Fs = 390Hz), potência de 608,58 kVAr e tensão nominal de 13,8kV a capacitância será:

$$C = 8{,}28\mu F$$

Pela equação 28, o indutor do reator será:

$$L = 20{,}12mH$$

O valor da resistência do indutor é obtido a partir da equação (30).

$$R_L = 0{,}99\,\Omega$$

Filtro de 11ª Harmônica

Portanto, para o filtro de 11ª ordem harmônica (Fs = 648Hz), potência de 299,7 kVAr e tensão nominal de 13,8kV a capacitância será:

$$C = 4{,}14\mu F$$

Pela equação 28, o indutor do reator será:

$$L = 14{,}58mH$$

O valor da resistência do indutor é obtido a partir da equação (30).

$$R_L = 1{,}19\,\Omega$$

Para um fator de amortecimento igual a 5 temos:

$$R_2 = 296{,}72\Omega$$

3.2 PEE/CEI: Cálculo da Capacitância e Indutância dos Filtros de 5ª, 7ª e 11ª Harmônica

Filtro de 5ª Harmônica

Portanto, para o filtro de 5ª ordem harmônica (Fs = 264Hz), potência de 915 kVAr e tensão nominal de 13,8kV a capacitância será:

$$C = 12{,}09\mu F$$

Pela equação 28, o indutor do reator será:

$$L = 30{,}05mH$$

O valor da resistência do indutor é obtido a partir da equação (30).

$$R_L = 0{,}99\,\Omega$$

Filtro de 7ª Harmônica

Portanto, para o filtro de 7ª ordem harmônica (Fs = 390Hz), potência de 608,58 kVAr e tensão nominal de 13,8kV a capacitância será:

$$C = 8{,}28\mu F$$

Pela equação 28, o indutor do reator será:

$$L = 20{,}12mH$$

O valor da resistência do indutor é obtido a partir da equação (30).

$$R_L = 0{,}99\,\Omega$$

Filtro de 11ª Harmônica

Portanto, para o filtro de 11ª ordem harmônica (Fs = 648Hz), potência de 299,7 kVAr e tensão nominal de 13,8kV a capacitância será:

$$C = 4{,}14\mu F$$

Pela equação 28, o indutor do reator será:

$$L = 14{,}58mH$$

O valor da resistência do indutor é obtido a partir da equação (30).

$$R_L = 1{,}19\,\Omega$$

Para um fator de amortecimento igual a 5 temos:

$$R_2 = 296{,}72\Omega$$

3.3 PEE/ANR: Cálculo da Capacitância e Indutância dos Filtros de 5ª, 7ª e 11ª Harmônica

Filtro de 5ª Harmônica

Portanto, para o filtro de 5ª ordem harmônica (Fs = 264Hz), potência de 915 kVAr e tensão nominal de 13,8kV a capacitância será:

$$C = 12{,}09\mu F$$

Pela equação 28, o indutor do reator será:

$$L = 30{,}05mH$$

O valor da resistência do indutor é obtido a partir da equação (30).

$$R_L = 0{,}99\,\Omega$$

Filtro de 7ª Harmônica

Portanto, para o filtro de 7ª ordem harmônica (Fs = 390Hz), potência de 608,58 kVAr e tensão nominal de 13,8kV a capacitância será:

$$C = 8{,}28\mu F$$

Pela equação 28, o indutor do reator será:

$$L = 20{,}12mH$$

O valor da resistência do indutor é obtido a partir da equação (30).

$$R_L = 0{,}99\,\Omega$$

Filtro de 11ª Harmônica

Portanto, para o filtro de 11ª ordem harmônica (Fs = 648Hz), potência de 299,7 kVAr e tensão nominal de 13,8kV a capacitância será:

$$C = 4{,}14\mu F$$

Pela equação 28, o indutor do reator será:

$$L = 14{,}58mH$$

O valor da resistência do indutor é obtido a partir da equação (30).

$$R_L = 1{,}19\ \Omega$$

Para um fator de amortecimento igual a 5 temos:

$$R_2 = 296{,}72\Omega$$

3.4 SE Brasília Centro: Cálculo da Capacitância e Indutância dos Filtros de 5ª, 7ª e 11ª Harmônica

Filtro de 5ª Harmônica

Portanto, para o filtro de 5ª ordem harmônica (Fs = 264Hz), potência de 915,7 kVAr e tensão nominal de 13,8kV a capacitância será:

$$C = 12{,}09\mu F$$

Pela equação 28, o indutor do reator será:

$$L = 30{,}05mH$$

O valor da resistência do indutor é obtido a partir da equação (30).

$$R_L = 0{,}99\ \Omega$$

Filtro de 7ª Harmônica

Assim, o valor da capacitância do filtro de 7ª harmônica (frequência de sintonia igual a 390 Hz) é dado pela equação abaixo.

Portanto, para o filtro de 7ª ordem harmônica, potência de 889,46 kVAr e tensão nominal de 13,8kV a capacitância será:

$$C = 12{,}09\mu F$$

Pela equação 28, o indutor do reator será:

$$L = 13{,}77mH$$

O valor da resistência do indutor é obtido a partir da equação (30).

$$R_L = 0{,}67\,\Omega$$

Filtro de 11ª Harmônica

Assim, o valor da capacitância do filtro de 11ª harmônica (frequência de sintonia igual a 648 Hz) é dado pela equação abaixo.

Portanto, para o filtro de 11ª ordem harmônica, potência de 875,92 kVAr e tensão nominal de 13,8kV a capacitância será:

$$C = 12{,}09\mu F$$

Pela equação 28, o indutor do reator será:

$$L = 4{,}99mH$$

O valor da resistência do indutor é obtido a partir da equação (30).

$$R_L = 0{,}41\,\Omega$$

Para um fator de amortecimento igual a 5 temos:

$$R_2 = 101{,}58\,\Omega$$

3.5 Águas Claras: Cálculo da Capacitância e Indutância dos Filtros de 5ª, 7ª e 11ª Harmônica

Filtro de 5ª Harmônica

Portanto, para o filtro de 5ª ordem harmônica (Fs = 264Hz), potência de 915,7 kVAr e tensão nominal de 13,8kV a capacitância será:

$$C = 12{,}09\mu F$$

Pela equação 28, o indutor do reator será:

$$L = 30{,}05mH$$

O valor da resistência do indutor é obtido a partir da equação (30).

$$R_L = 0{,}99\,\Omega$$

Filtro de 7ª Harmônica

Assim, o valor da capacitância do filtro de 7ª harmônica (frequência de sintonia igual a 390 Hz) é dado pela equação abaixo.

Portanto, para o filtro de 7ª ordem harmônica, potência de 889,46 kVAr e tensão nominal de 13,8kV a capacitância será:

$$C = 12{,}09\mu F$$

Pela equação 28, o indutor do reator será:

$$L = 13{,}77mH$$

O valor da resistência do indutor é obtido a partir da equação (30).

$$R_L = 0{,}67\,\Omega$$

Filtro de 11ª Harmônica

Assim, o valor da capacitância do filtro de 11ª harmônica (frequência de sintonia igual a 648 Hz) é dado pela equação abaixo.

Portanto, para o filtro de 11ª ordem harmônica, potência de 875,92 kVAr e tensão nominal de 13,8kV a capacitância será:

$$C = 12{,}09\mu F$$

Pela equação 28, o indutor do reator será:

$$L = 4{,}99mH$$

O valor da resistência do indutor é obtido a partir da equação (30).

$$R_L = 0{,}41\,\Omega$$

Para um fator de amortecimento igual a 5 temos:

$$R_2 = 101{,}58\,\Omega$$

3.6 SE Ceilândia Sul: Cálculo da Capacitância e Indutância dos Filtros de 5ª, 7ª e 11ª Harmônica

Filtro de 5ª Harmônica

Portanto, para o filtro de 5ª ordem harmônica (Fs = 264Hz), potência de 915,7 kVAr e tensão nominal de 13,8kV a capacitância será:

$$C = 12{,}09\mu F$$

Pela equação 28, o indutor do reator será:

$$L = 30{,}05mH$$

O valor da resistência do indutor é obtido a partir da equação (30).

$$R_L = 0{,}99\,\Omega$$

Filtro de 7ª Harmônica

Assim, o valor da capacitância do filtro de 7ª harmônica (frequência de sintonia igual a 390 Hz) é dado pela equação abaixo.

Portanto, para o filtro de 7ª ordem harmônica, potência de 889,46 kVAr e tensão nominal de 13,8kV a capacitância será:

$$C = 12{,}09\mu F$$

Pela equação 28, o indutor do reator será:

$$L = 13{,}77mH$$

O valor da resistência do indutor é obtido a partir da equação (30).

$$R_L = 0{,}67\,\Omega$$

Filtro de 11ª Harmônica

Assim, o valor da capacitância do filtro de 11ª harmônica (frequência de sintonia igual a 648 Hz) é dado pela equação abaixo.

Portanto, para o filtro de 11ª ordem harmônica, potência de 875,92 kVAr e tensão nominal de 13,8kV a capacitância será:

$$C = 12{,}09\mu F$$

Pela equação 28, o indutor do reator será:

$$L = 4{,}99mH$$

O valor da resistência do indutor é obtido a partir da equação (30).

$$R_L = 0{,}41\,\Omega$$

Para um fator de amortecimento igual a 5 temos:

$$R_2 = 101{,}58\,\Omega$$

3.7 PEE Hípica: Cálculo da Capacitância e Indutância dos Filtros de 5ª, 7ª e 11ª Harmônica

Filtro de 5ª Harmônica

Portanto, para o filtro de 5ª ordem harmônica (Fs = 264Hz), potência de 915,7 kVAr e tensão nominal de 13,8kV a capacitância será:

$$C = 12{,}09\mu F$$

Pela equação 28, o indutor do reator será:

$$L = 30{,}05mH$$

O valor da resistência do indutor é obtido a partir da equação (30).

$$R_L = 0{,}99\ \Omega$$

Filtro de 7ª Harmônica

Assim, o valor da capacitância do filtro de 7ª harmônica (frequência de sintonia igual a 390 Hz) é dado pela equação abaixo.

Portanto, para o filtro de 7ª ordem harmônica, potência de 889,46 kVAr e tensão nominal de 13,8kV a capacitância será:

$$C = 12{,}09\mu F$$

Pela equação 28, o indutor do reator será:

$$L = 13{,}77mH$$

O valor da resistência do indutor é obtido a partir da equação (30).

$$R_L = 0{,}67\ \Omega$$

Filtro de 11ª Harmônica

Assim, o valor da capacitância do filtro de 11ª harmônica (frequência de sintonia igual a 648 Hz) é dado pela equação abaixo.

Portanto, para o filtro de 11ª ordem harmônica, potência de 875,92 kVAr e tensão nominal de 13,8kV a capacitância será:

$$C = 12{,}09\mu F$$

Pela equação 28, o indutor do reator será:

$$L = 4{,}99mH$$

O valor da resistência do indutor é obtido a partir da equação (30).

$$R_L = 0{,}41\ \Omega$$

Para um fator de amortecimento igual a 5 temos:

$$R_2 = 101{,}58\ \Omega$$

4 DIMENSIONAMENTO DOS CABOS DO DISJUNTOR GERAL ATÉ O BARRAMENTO DE ENTRADA DO FILTRO DE TRIPLA SINTONIA: PEE/SAM, PEE/CEI E PEE/ANR

A potência dos filtros de tripla sintonia, 5ª, 7ª e 11ª harmônica, atinge 5775 kVAr. Assim, a corrente nominal drenada pelos filtros será de 133,37 A por fase.

✓ Critério da Corrente Nominal

Pelo critério da corrente nominal a seção do cabo deve ser superior em 2 ou 3 vezes à seção correspondente a corrente nominal. Assim, a seção deveria ser de 50 mm^2 por fase.

✓ Critério da Corrente de Curto-Circuito

Pelo critério da corrente de curto-circuito o condutor deve suportar a mesma durante 1 segundo.

A pior corrente de curto-circuito calculada atinge aproximadamente 20 kA (referência obtida padronizando a maior corrente de curto-circuito informada pela CEB para os pontos de instalação dos filtros de harmônicos, conforme mostrado no Anexo II dos relatórios técnicos para a Expansão e para Modernização).

Assim, pelo critério de suportabilidade à corrente supracitada durante 60 ciclos, a seção nominal dos condutores entre o disjuntor geral e o barramento dos filtros deverá ser de 120 mm^2 por fase.

A figura abaixo apresenta as curvas de suportabilidade do condutor Eprotenax Compact 105º, cobre, corrente em função da seção nominal do condutor.

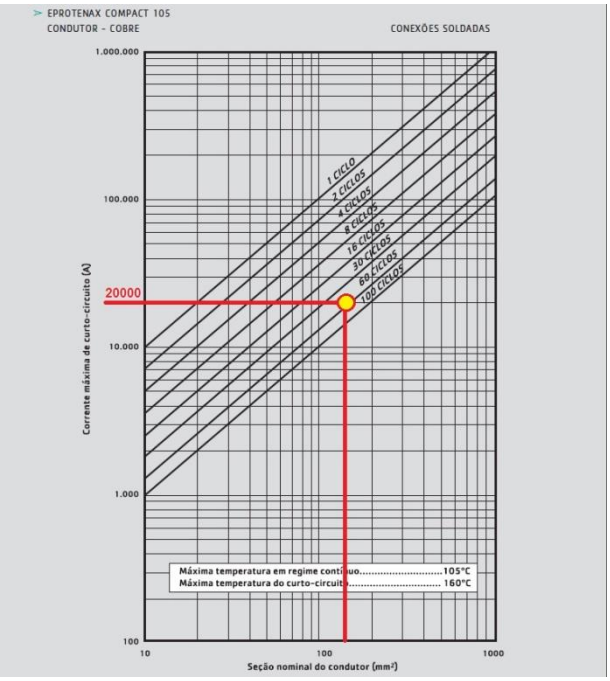


Figura 7 – Correntes máximas de curto-circuito no condutor.

Assim, a seção nominal do condutor que conecta o disjuntor geral ao barramento do filtro de tripla sintonia deve ser de 120 mm^2 por fase.

5 DIMENSIONAMENTO DOS CABOS DO DISJUNTOR GERAL ATÉ O BARRAMENTO DE ENTRADA DO FILTRO DE TRIPLA SINTONIA: SE SO, SE AC, SE BC E PEE/HIP

A potência dos filtros de tripla sintonia, 5ª, 7ª e 11ª harmônica, atinge 8550 kVAr. Assim, a corrente nominal drenada pelos filtros será de 197,45 A por fase.

✓ **Critério da Corrente Nominal**

Pelo critério da corrente nominal a seção do cabo deve ser superior em 2 ou 3 vezes à seção correspondente a corrente nominal. Assim, a seção deveria ser de 70 mm^2 por fase.

✓ **Critério da Corrente de Curto-Circuito**

Pelo critério da corrente de curto-circuito o condutor deve suportar a mesma durante 1 segundo.

A pior corrente de curto-circuito calculada atinge aproximadamente 20 kA (referência obtida padronizando a maior corrente de curto-circuito informada pela CEB para os pontos de instalação dos filtros de harmônicos, conforme mostrado no Anexo II dos relatório técnicos para a Expansão e para Modernização).

Assim, pelo critério de suportabilidade à corrente supracitada durante 60 ciclos, a seção nominal dos condutores entre o disjuntor geral e o barramento dos filtros deverá ser de 120 mm^2 por fase.

A figura abaixo apresenta as curvas de suportabilidade do condutor Eprotenax Compact 105º, cobre, corrente em função da seção nominal do condutor.

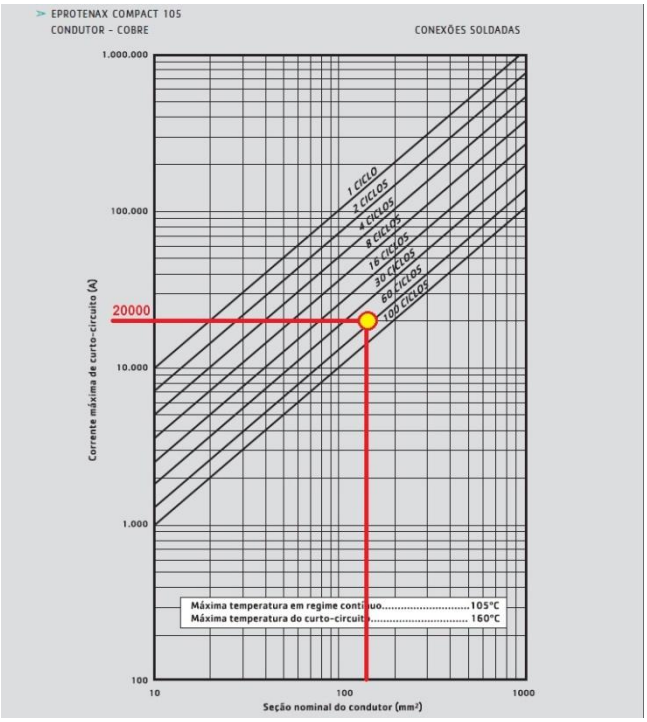


Figura 8 – Correntes máximas de curto-circuito no condutor.

Assim, a seção nominal do condutor que conecta o disjuntor geral ao barramento do filtro de tripla sintonia deve ser de 120 mm^2 por fase.