

1 Filtros Ativos Em Sistemas Elétricos

30 Págs

1.1 Potência Ativa, Reativa e Fator de Potência

Como forma de entender melhor a qualidade de energia e a operação de filtros ativos é necessário ter os conceitos de potência ativa, reativa e fator de potência .

Para entender melhor a definição de potência em circuitos elétricos é necessário antes desenvolver alguns conceitos utilizados no desenvolvimento matemático para a interpretação das grandezas físicas. Ao longo da história várias teorias foram abordadas e importantes trabalhos são reconhecidamente aceitos para detalhar de melhor maneira casos desde específicos, quanto generalista no enfoque quanto a relação de tensão e corrente de um circuito elétrico. Esse estudo todo deu origem a área de teoria da potência, a qual vem sendo estudada até os dias de hoje para o aprofundamento e elaboração de novos conceitos para explicar fenômenos específicos [1] .

A teoria da potência tem o intuito de avaliar a troca de energia entre fonte de potência elétrica e a carga do ponto de vista das características dos valores de tensão corrente em seus terminais [2]. Esse estudo tem por finalidade aferir o fator de potência, a qual é um parâmetro intrínseco ao circuito e depende apenas das características da carga, independentemente da fonte. Cabe salientar que a carga possui características distintas ao circuito, de modo que a sua disposição na estrutura de diferentes sistemas leva a uma caracterização diferente do fator de potência. Ainda na avaliação de troca de energia entre os elementos do circuito, o estudo da teoria da potência tem por finalidade prover informações a respeito da eficiência na troca de energia entre fontes e cargas. A eficiência na troca de potência em circuitos é avaliada segundo a corrente que circula pelo mesmo. Esse conceito afere a mínima corrente necessária para transferir uma quantidade energia num determinado espaço de tempo dada uma tensão específica [2]. O fator de potência está intimamente ligado à eficiência na troca de energia, sendo que em circuitos a qual seu valor é baixo existe um alto valor de corrente a qual circula, porém não é convertido em trabalho na saída do sistema. A consequência da presença de uma corrente excedente circulante é dada pela sobrecarga da fonte, aumento das perdas nos condutores e degradação da qualidade de energia. Esta ultima é mostrada na seção ?? . Nessa seção será mostrada que a incidência de correntes com distorção harmônica traz eleva a potência necessária extraída da fonte para uma determinada carga ativa do sistema. Com isso o

fator de potência é degradado, fazendo com que seu valor seja diminuído. Com isso será mostrado que para o caso onde o fator de potência é unitário tem-se que a qualidade de energia é tida como perfeita e há plena eficiência na troca de energia entre fontes e cargas.

Dentre as principais grandezas a ser estudada na Teoria da Potência elenca-se a potência ativa e aparente. É conhecido que na operação de um circuito elétrico que nem toda a corrente proveniente de uma fonte de tensão é convertida em trabalho para cada unidade de tempo. Nesse contexto aplica-se a definição de potência ativa, a qual é a corrente que efetivamente é transferida de uma fonte para a carga de maneira a gerar trabalho na saída do sistema. Há também a potência aparente que é definida com a potência que é gerada por uma fonte de energia e que circula pelo sistema na forma de corrente elétrica, sem necessariamente ser convertida em trabalho na saída do sistema. Esse contexto pode-se estender para o entendimento para qualidade de energia de um sistema

Para o estudo a seguir sobre a definição de potência é necessário antes ter conhecimento de algumas definições sobre os parâmetros elétricos. Dentre essas definições, tem-se a determinação de valores eficazes de funções. Dada uma função qualquer no domínio do tempo $f(t)$, periódica e com período cujo valor é T , a formulação matemática para encontrar seu valor eficaz recai segundo a norma Euclidiana [1], dada pela seguinte equação:

$$F_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T f(t)^2 dt} \quad (1.1)$$

1.1.0.1 Monofásico

Dada uma função $f(t)$ sinusoidal com a frequência angular ωt e amplitude cujo valor de pico é dado por F_p , tem-se que o valor eficaz de $f(t)$ é dada segundo a equação:

$$F_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [F_p \cos(\omega t + \phi)]^2 dt} = \frac{1}{\sqrt{2}} F_p \quad (1.2)$$

Portanto tem-se que o valor de pico de uma função sinusoidal é $\sqrt{2}$ vezes maior que o valor eficaz. Cabe enfatizar que essa determinação desse valor é independente da frequência angular e ângulo da função.

O conceito mais simples para o estudo da transferência de potência pode ser aplicado ao circuito mais simples. Considerando um circuito monofásico, senoidal linear e operando em regime permanente, as equações da tensão e corrente são expressas por 1.3

e 1.4, respectivamente.

$$v(t) = \sqrt{2} V \cos(\omega t) \quad (1.3)$$

$$i(t) = \sqrt{2} I \cos(\omega t - \phi) \quad (1.4)$$

A potência instantânea em um circuito monofásico é definida segundo a equação 1.5.

$$\begin{aligned} p(t) &= v(t)i(t) \\ &= 2 V \cos(\omega t) I \cos(\omega t - \phi) \\ &= VI [\cos(\phi) + \cos(2\omega t - \phi)] \\ &= VI \cos(\phi) [1 + \cos(2\omega t)] + VI \sin(\phi) \sin(2\omega t) \end{aligned} \quad (1.5)$$

A equação 1.5 pode ser dividido em dois termos variantes no tempo: o primeiro é dado por

$$VI \cos(\phi) [1 + \cos(2\omega t)] \quad (1.6)$$

e o segundo por.

$$VI \sin(\phi) \sin(2\omega t) \quad (1.7)$$

Por definição, a potência ativa é definida pelo valor médio da equação 1.6, ou seja, pela expressão 1.11, e a potência reativa é definida pelo valor de pico da equação ??, ou pela expressão 1.9.

$$P = VI \cos \phi \quad (1.8)$$

$$Q = VI \sin \phi \quad (1.9)$$

A definição de potência aparente é dada pela multiplicação dos valores eficazes da tensão e corrente, respectivamente, ou seja:

$$S = V I \quad (1.10)$$

A expressão de S pode ser avinda através dos valores de P e Q . Considerando as

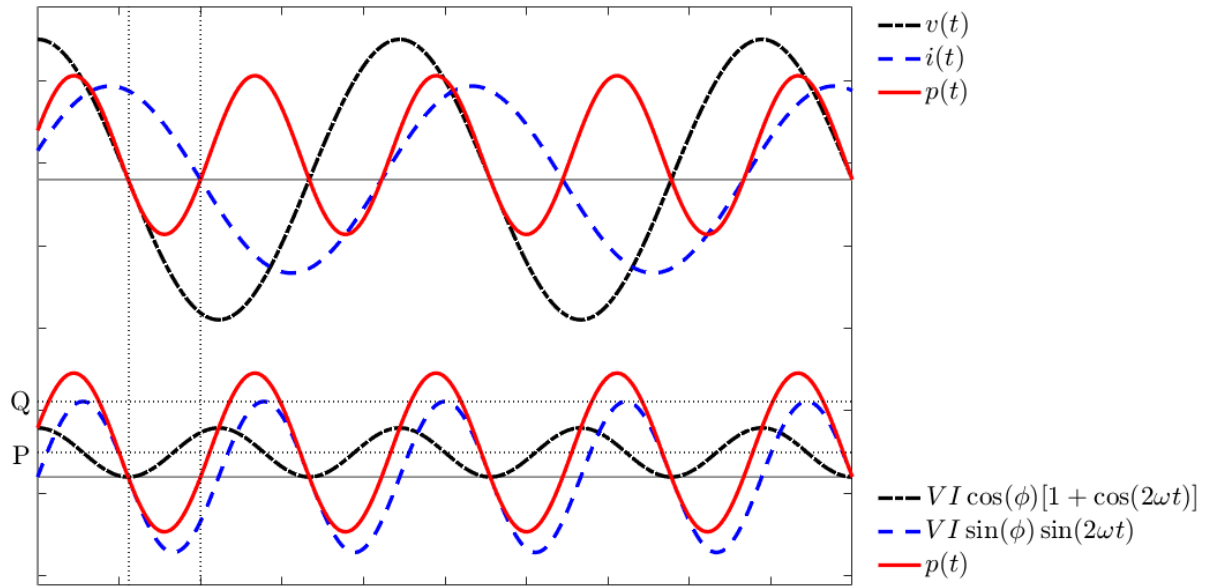


FIGURA 1 – Circuito real monofásico

mesmas referencias de defasagem de ângulo das expressões 1.3 e 1.4, tem-se que a seguinte expressão pode ser concebida:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{(VI \cos \phi)^2 + (VI \sin \phi)^2} = VI \quad (1.11)$$

Com isso pode inferir o triângulo de cargas. isso vem também do fato dos fasores serem legais, pode cre.

1.1.0.2 Monofásico

Para o estudo proposto nesse trabalho a teoria da potência proposta por Stanislaw Fryze é suficientemente completa para o entendimento da questão de potência.

Segundo Fryze [1] em sinais periódicos com forma de onda qualquer, define-se que a potência ativa de um sistema é dado segundo o valor médio da potência instantânea. A potência instantânea é definida pela multiplicação da tensão e corrente instantâneas, representadas por $v(t)$ e $i(t)$, respectivamente. Sendo assim define-se a potência ativa por:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) i(t) dt \quad (1.12)$$

A definição de potência aparente então pode ser expressa segundo a equação:

$$S = VI \quad (1.13)$$

Falar brevemente do bafunho de Budeanu, mas que não é muito mais aceito devido ao fato de que leva as interpretações errôneas

Enfatizando que V e I da equação ?? são os valores eficazes de encontrados nas equações ?? e ??, respectivamente.

Outra definição importante na teoria da potência vem da relação entre os valores S e P para a determinação de potência reativa, ou seja, aquela que circula pela rede porém sem contribuir para a geração de trabalho na saída do sistema. A definição de potência reativa é dada a seguir:

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (1.14)$$

Com essas definições como base, Fryze propôs a decomposição de corrente total em componentes de corrente ativa e reativa. Essa definição separa da corrente circulante aquelas que realmente transfere energia para a carga. Tal corrente é determinada segundo uma condutância equivalente G_P da carga monofásica. A interpretação de tal condutância equivalente representa uma carga puramente resistiva, a qual para uma mesma tensão, absorve a mesma potência ativa da carga realmente utilizada. A definição da corrente ativa, juntamente com a inclusão da condutância equivalente é dada a seguir:

$$i_p(t) = \frac{P}{V^2}v(t); \quad G_P = \frac{P}{V^2} \rightarrow i_p(t) = G_P v(t) \quad (1.15)$$

Como explicado anteriormente, $i_p(t)$ é apenas uma componente da corrente total instantânea. Existe ainda uma parcela da corrente a qual não contribui para a transferência de potência para a carga, denominada corrente reativa, e que pode ser definida a partir da equação:

$$i_q(t) = i(t) - i_p(t) \quad (1.16)$$

Uma característica importante a ressaltar é a ortogonalidade apresentada entre i_p e i_q . Esse fato vem do desenvolvimento das equações que definem a potência e demonstram importante característica ao sistema. Por ser ortogonais as correntes i_p e i_q existe a seguinte implicação:

$$\frac{1}{T} \int_0^T i_p(t)i_q(t) dt = 0 \iff I^2 = I_p^2 + I_q^2 \quad (1.17)$$

1.1.1 Potências em Sistemas Senoidais

1.1.1.1 Trifásico

1.1.2 Definição de Potências em Sistemas Não-Senoidais

1.1.3 Potência Instantânea Utilizando a Teoria P-Q

1.1.3.1 considerando coordenadas abc

Tendo o sistema com as tensões e correntes definidas por:

$$\mathbf{v} = \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (1.18)$$

$$\mathbf{i} = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (1.19)$$

A potência ativa instantânea do sistema é definida por

$$p \triangleq \mathbf{v} \cdot \mathbf{i} \quad (1.20)$$

e a potência reativa instantânea do sistema é definido por

$$q \triangleq \mathbf{v} \times \mathbf{i} \quad (1.21)$$

A potência \mathbf{q} é dada por um vetor na forma:

$$\mathbf{q} = \begin{bmatrix} q_a \\ q_b \\ q_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_b i_c - v_c i_b \\ v_c i_a - v_a i_c \\ v_a i_b - v_b i_a \end{bmatrix} \quad (1.22)$$

Ainda é definido a corrente ativa instantanea por:

$$\mathbf{i}_p = \begin{bmatrix} i_{ap} \\ i_{bp} \\ i_{cp} \end{bmatrix} \triangleq \frac{p}{\mathbf{v} \cdot \mathbf{v}} \mathbf{v} \quad (1.23)$$

Ainda é definido a corrente reativa instantanea por:

$$\mathbf{i}_q = \begin{bmatrix} i_{aq} \\ i_{bq} \\ i_{cq} \end{bmatrix} \triangleq \frac{\mathbf{q} \times \mathbf{v}}{\mathbf{v} \cdot \mathbf{v}} \quad (1.24)$$

$$\mathbf{i}_p = \begin{bmatrix} i_{ap} \\ i_{bp} \\ i_{cp} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_a \left(\frac{v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c}{v_a^2 + v_b^2 + v_c^2} \right) \\ v_b \left(\frac{v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c}{v_a^2 + v_b^2 + v_c^2} \right) \\ v_c \left(\frac{v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c}{v_a^2 + v_b^2 + v_c^2} \right) \end{bmatrix} \quad (1.25)$$

$$\mathbf{i}_q = \begin{bmatrix} i_{aq} \\ i_{bq} \\ i_{cq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{v_c(v_c i_a - v_a i_c) - v_b(v_a i_b - v_b i_a)}{v_a^2 + v_b^2 + v_c^2} \\ \frac{v_a(v_a i_b - v_b i_a) - v_c(v_b i_c - v_c i_b)}{v_a^2 + v_b^2 + v_c^2} \\ \frac{v_b(v_b i_c - v_c i_b) - v_a(v_c i_a - v_a i_v)}{v_a^2 + v_b^2 + v_c^2} \end{bmatrix} \quad (1.26)$$

Fazendo a soma de \mathbf{i}_p com \mathbf{i}_q obtém-se a seguinte relação:

$$\mathbf{i}_p + \mathbf{i}_q = \begin{bmatrix} \frac{v_a(v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c)}{v_a^2 + v_b^2 + v_c^2} + \frac{v_c(v_c i_a - v_a i_c) - v_b(v_a i_b - v_b i_a)}{v_a^2 + v_b^2 + v_c^2} \\ \frac{v_b(v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c)}{v_a^2 + v_b^2 + v_c^2} + \frac{v_a(v_a i_b - v_b i_a) - v_c(v_b i_c - v_c i_b)}{v_a^2 + v_b^2 + v_c^2} \\ \frac{v_c(v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c)}{v_a^2 + v_b^2 + v_c^2} + \frac{v_b(v_b i_c - v_c i_b) - v_a(v_c i_a - v_a i_v)}{v_a^2 + v_b^2 + v_c^2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \mathbf{i} \quad (1.27)$$

ou seja, prova-se que pela definição de corrente i_p e i_q que a composição estas é dada pela corrente suprida pelo fonte à carga do sistema. Ainda pela definição de i_p e i_q ,

utilizando a definição em (EQUACAO p) porém utilizando $p = \mathbf{v} \cdot \mathbf{i}_q$ temos:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{v} \cdot \mathbf{i}_q &= \mathbf{v} \cdot \left(\frac{\mathbf{q} \times \mathbf{v}}{\mathbf{v} \cdot \mathbf{v}} \right) \\
 &= \mathbf{v} \cdot \left(\frac{(\mathbf{v} \times \mathbf{i}) \times \mathbf{v}}{\mathbf{v} \cdot \mathbf{v}} \right) \\
 &= \mathbf{v} \cdot \left(\frac{-(\mathbf{i} \cdot \mathbf{v})\mathbf{v} + (\mathbf{v} \cdot \mathbf{v})\mathbf{i}}{\mathbf{v} \cdot \mathbf{v}} \right) \\
 &= \frac{-(\mathbf{i} \cdot \mathbf{v})(\mathbf{v} \cdot \mathbf{v}) + (\mathbf{v} \cdot \mathbf{v})(\mathbf{i} \cdot \mathbf{v})}{\mathbf{v} \cdot \mathbf{v}} \\
 &= 0
 \end{aligned} \tag{1.28}$$

ou seja, prova-se que pela definição de corrente i_p e i_q que a composição estas é dada pela corrente suprida pelo fonte à carga do sistema. Ainda pela definição de i_p e i_q , utilizando a definição em (EQUACAO p) porém utilizando $p = \mathbf{v} \cdot \mathbf{i}_q$ temos:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{v} \times \mathbf{i}_p &= \mathbf{v} \times \left(\frac{p}{\mathbf{v} \cdot \mathbf{v}} \mathbf{v} \right) \\
 &= \mathbf{0}
 \end{aligned} \tag{1.29}$$

isto também implica que as correntes \mathbf{i}_q são ortogonais à \mathbf{v} , ou seja $\mathbf{v} \cdot \mathbf{i}_q \equiv 0$ e que as correntes \mathbf{i}_p são paralelas à \mathbf{v} , ou então $\mathbf{v} \times \mathbf{i}_p \equiv 0$. Isto trás uma implicação importante que é a ortogonalidade entre as correntes \mathbf{i}_p e \mathbf{i}_q no sistema, ou seja:

$$\mathbf{i}_p \cdot \mathbf{i}_q \equiv 0 \tag{1.30}$$

Com isso, também é mostrado que a parcela da corrente \mathbf{i}_p corresponde apenas a transferência de potência ativa instantânea no sistema. Por outro lado tem-se que a corrente \mathbf{i}_q corresponde apenas a parcela da potência reativa instantânea do sistema

A teoria p-q é baseada na transformação das tensões e correntes das coordenadas abc para $\alpha\beta 0$

[3] [4]

1.1.3.2 considerando coordenadas $\alpha\beta 0$

1.1.3.3 Transformada de Clarke

$$\begin{bmatrix} v_0 \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (1.31)$$

1.2 Filtros Ativos

1.2.1 Filtros Ativo Empregando a Teoria P-Q

Referências Bibliográficas

- [1] PAREDES, H. K. M. *Eletrônica de Potência para Geração, Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica: Tópicos em teorias de potência em condições não ideais de operação*. Acessado em 24/06/2016. Disponível em: <<http://www.dsce.fee.unicamp.br/antenor/pdf/it744/CAP6.pdf>>.
- [2] STAUDT, V. Fryze-buchholz-depenbrock: A time-domain power theory. In: IEEE. *2008 International School on Nonsinusoidal Currents and Compensation*. [S.l.], 2008. p. 1–12.
- [3] PENG, F. Z.; LAI, J.-S. Generalized instantaneous reactive power theory for three-phase power systems. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, IEEE, v. 45, n. 1, p. 293–297, 1996.
- [4] AKAGI, H.; KANAZAWA, Y.; NABAE, A. Instantaneous reactive power compensators comprising switching devices without energy storage components. *IEEE Transactions on industry applications*, IEEE, n. 3, p. 625–630, 1984.