1 Filtros Ativos Em Sistemas Elétricos

30 Págs

1.1 Definição de 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 [**?**] .

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 extender para o entendimento para qualidade de energia de um sistema

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 [**?**] 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 tem-se que a potência ativa é definida por:

$$P = \frac{1}{T}\int_0^T p(t)dt = \frac{1}{T}\int_0^T v(t)i(t)dt \tag{1.1}$$

Para a definição de potência aparente, primeiramente será necessário definir alguns aspectos sobre valores eficazes da tensão e corrente. A formulação matemática para encontrar o valor tais valores eficazes são expressas segundo a norma Euclidiana, dadas pelas seguintes equações:

$$V = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T v(t)^2 dt} \tag{1.2}$$

$$I = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T i(t)^2 dt} \tag{1.3}$$

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

$$S = VI \tag{1.4}$$

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:

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \tag{1.5}$$

Com essas definições como como base Fryze foi quem propôs a decomposição de corrente total em componentes de corrente ativa e reativa. Essa definição é 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:

$$i_p(t) = \frac{P}{V^2}v(t) \tag{1.6}$$

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:

$$i_q(t) = i(t) - i_p(t) \tag{1.7}$$

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:

$$\frac{1}{T}\int_0^T i_p(t)i_q(t) = 0 \Longleftrightarrow I^2 = I_p^2 + I_q^2 \tag{1.8}$$

1.1.1 Potências em Sistemas Senoidais

1.1.1.1 Monofásico

Considerando um circuito monofásico, senoidal linear e operando em regime permanente, as equações da tensão e corrente são expressas por 1.9 e 1.10, respectivamente.

$$v(t) = \sqrt{2}\,V\cos(\omega t) \tag{1.9}$$

$$i(t) = \sqrt{2}\,I\cos(\omega t - \phi) \tag{1.10}$$

A potência instantânea em um circuito monofásico é definida segundo a equação 1.11.

$$\begin{aligned} p(t) &= v(t)i(t) \\ &= 2\,V\cos(\omega t)I\cos(\omega t - \phi) \\ &= VI[\cos(\phi) + \cos(2\omega t - \phi)] \\ &= VI\cos(\phi)[1 + \cos(2\omega t)] + VI\sin(\phi)\sin(2\omega t) \end{aligned} \tag{1.11}$$

A equação 1.11 pode ser dividido em dois termos variantes no tempo: o primeiro é dado por

$$VI\cos(\phi)[1+\cos(2\omega t)] \tag{1.12}$$

e o segundo por.

$$VI\sin(\phi)\sin(2\omega t) \tag{1.13}$$

Por definição, a potência ativa é definida pelo valor médio da equação 1.12, ou seja, pela expressão 1.17, e a potência reativa é definida pelo valor de pico da equação 1.13, ou pela expressão 1.15.

$$P = VI\cos\phi \tag{1.14}$$

$$Q = VI\sin\phi \tag{1.15}$$

verificar sobre valores de pico e valores eficazes

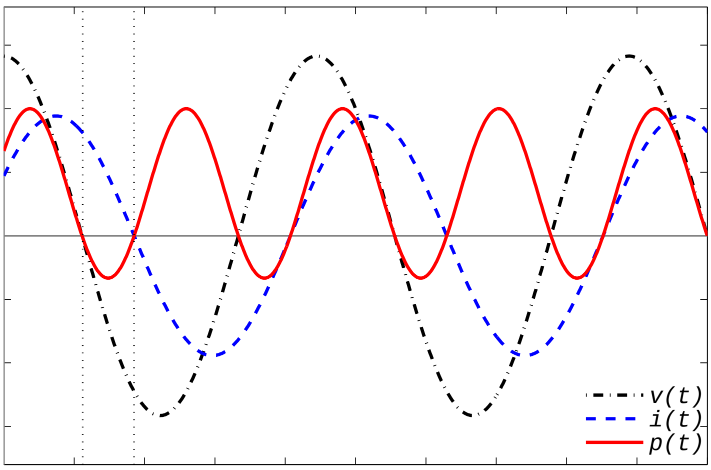

FIGURA 1 – Circuito real monofásico

essas figuras estão com as legendas erradas

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

$$S = V\,I \tag{1.16}$$

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

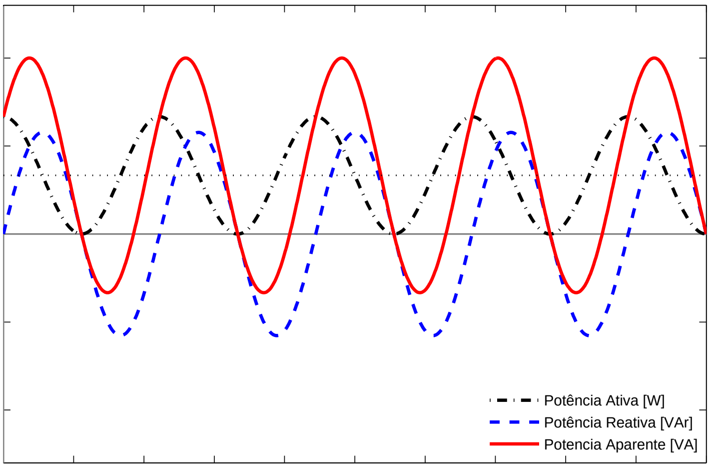

FIGURA 2 – Circuito real monofásico

as mesmas referencias de defasagem de angulo das expressões 1.9 e 1.10, tem-se que a segunte expressão pode ser concebida:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{(VI\cos\phi)^2 + (VI\sin\phi)^2} = VI \tag{1.17}$$

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

1.1.1.2 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:

$$\mathbf{v} = \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \tag{1.18}$$

$$\mathbf{i} = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \tag{1.19}$$

A potência ativa instantânea do sistema é definida por

$$p \triangleq \mathbf{v} \cdot \mathbf{i} \tag{1.20}$$

e a potência reativa instantânea do sistema é definido por

$$q \triangleq \mathbf{v} \times \mathbf{i} \tag{1.21}$$

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

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

Ainda é defnido a corente ativa instantanea por:

$$\mathbf{i_p} = \begin{bmatrix} i_{ap} \\ i_{bp} \\ i_{cp} \end{bmatrix} \triangleq \frac{p}{\mathbf{v} \cdot \mathbf{v}} \mathbf{v} \tag{1.23}$$

Ainda é defnido a corente reativa instantanea por:

$$\mathbf{i_q} = \begin{bmatrix} i_{aq} \\ i_{bq} \\ i_{cq} \end{bmatrix} \triangleq \frac{\mathbf{q} \times \mathbf{v}}{\mathbf{v} \cdot \mathbf{v}} \tag{1.24}$$

$$\mathbf{i_p} = \begin{bmatrix} i_{ap} \\ i_{bp} \\ i_{cp} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_a \left(\dfrac{v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c}{v_a^2 + v_b^2 + v_c^2} \right) \\ v_b \left(\dfrac{v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c}{v_a^2 + v_b^2 + v_c^2} \right) \\ v_c \left(\dfrac{v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c}{v_a^2 + v_b^2 + v_c^2} \right) \end{bmatrix} \tag{1.25}$$

$$\mathbf{i_q} = \begin{bmatrix} i_{aq} \\ i_{bq} \\ i_{cq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dfrac{v_c(v_c i_a - v_a i_c) - v_b(v_a i_b - v_b i_a)}{v_a^2 + v_b^2 + v_c^2} \\ \dfrac{v_a(v_a i_b - v_b i_a) - v_c(v_b i_c - v_c i_b)}{v_a^2 + v_b^2 + v_c^2} \\ \dfrac{v_b(v_b i_c - v_c i_b) - v_a(v_c i_a - v_a i_v)}{v_a^2 + v_b^2 + v_c^2} \end{bmatrix} \tag{1.26}$$

Fazendo a soma de $\mathbf{i_p}$ com $\mathbf{i_q}$ obtém-se a seguinte relação:

$$\mathbf{i_p} + \mathbf{i_q} = \begin{bmatrix} \dfrac{v_a(v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c)}{v_a^2 + v_b^2 + v_c^2} + \dfrac{v_c(v_c i_a - v_a i_c) - v_b(v_a i_b - v_b i_a)}{v_a^2 + v_b^2 + v_c^2} \\ \dfrac{v_b(v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c)}{v_a^2 + v_b^2 + v_c^2} + \dfrac{v_a(v_a i_b - v_b i_a) - v_c(v_b i_c - v_c i_b)}{v_a^2 + v_b^2 + v_c^2} \\ \dfrac{v_c(v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c)}{v_a^2 + v_b^2 + v_c^2} + \dfrac{v_b(v_b i_c - v_c i_b) - v_a(v_c i_a - v_a i_v)}{v_a^2 + v_b^2 + v_c^2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \mathbf{i} \tag{1.27}$$

ou seja, prova-se que pela definição de corrente ip e iq que a composição estas é dada pela corrente suprida pelo fonte à carga do sistema. Ainda pela definição de ip e iq, 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 ip e iq que a composição estas é dada pela corrente suprida pelo fonte à carga do sistema. Ainda pela definição de ip e iq, 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 tambem 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 $\alpha\beta0$

[1] [2]

1.1.3.2 considerando coordenadas $\alpha\beta0$

1.1.3.3 Transformada de Clarke

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

1.2 Filtros Ativos

1.2.1 Filtros Ativo Empregando a Teoria P-Q

Referências Bibliográficas

[1] 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.

[2] 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.