ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos

PSI - EPUSP

PSI 3214 - LABORATÓRIO DE INSTRUMENTAÇÃO ELÉTRICA

Experiência 4 – Potência em Corrente Alternada

Introdução Teórica

Hernan P. Schmidt
Revisado por Leopoldo Yoshioka e Elisabete Galeazzo
Versão 2020

1. Objetivos

- Verificar as definições e conceitos associados à potência elétrica e ao fator de potência;
- Efetuar simulações (por meio de atividade remota) e medições em bipolos (por meio de atividade presencial) comumente encontrados em sistemas monofásicos;
- Verificar as leis de conservação aplicáveis.

2. Introdução

A energia elétrica é uma das principais fontes de energia. Ela é utilizada para iluminação, atividades industriais e residenciais, transporte, entre outras possibilidades. A maioria dos equipamentos e dispositivos elétricos e eletrônicos depende dela. Porém, para termos acesso à energia elétrica (gerada preponderantemente pelas usinas hidrelétricas e termoelétricas no Brasil) precisamos pagar pelo seu consumo, de acordo com a tarifação estabelecida pela companhia de distribuição de energia elétrica. No caso da cidade de São Paulo, a empresa responsável pela distribuição de energia é a Enel (Enel Distribuição São Paulo) (www.eneldistribuicaosp.com.br). Trata-se de um serviço público regulado, no Brasil, pela ANEEL (http://www.aneel.gov.br/).

O valor que pagamos à concessionária inclui o custo da energia elétrica (53,5%), mas também os custos referentes à distribuição (17%) e tributos (29,5%), como mostrado na Figura 1.

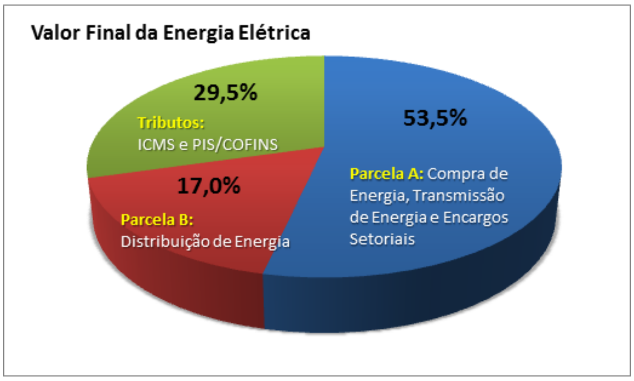

Figura 1 – Composição de valor de energia elétrica (Fonte: ANEEL).

A potência elétrica é uma das grandezas física mais relevantes a ser considerada em sistemas elétricos. Como veremos adiante, devemos observar que existirão sempre dois lados nesses sistemas: aquele que “fornece” e o que “consome” ou “absorve” a potência elétrica. O primeiro pode ser uma fonte (DC), um gerador (AC) ou a rede elétrica (AC/60 Hz no Brasil). O segundo é, em geral, uma carga (ou várias cargas), que pode ser uma lâmpada, um motor ou um equipamento.

A unidade de potência mais conhecida é o **watt** [W], porém existem outras duas unidades que são o **volt-ampère** [VA] e o **volt-ampère reativo** [VAr] (ao longo deste documento serão definidas as grandezas associadas a tais unidades). Devemos observar também que a potência é uma grandeza que representa o consumo (ou o fornecimento) de energia em joules [J] por unidade de tempo (segundo) [s].

Nas próximas seções apresentaremos definições e conceitos sobre potência e fator de potência.

3. Nomenclatura e convenção de sinal para a corrente

Nesta experiência trabalharemos com tensões e correntes senoidais, cuja representação através de fasores simplifica bastante as operações de adição e subtração exigidas pelas leis de Kirchhoff. Assim, uma tensão senoidal será representada pela Eq. (1), em que V_{max} indica a amplitude da tensão [V], $\frac{V_{max}}{\sqrt{2}}$ é a tensão eficaz [V], ω é a frequência angular [rad/s] e θ é o ângulo (ou fase) inicial [° ou rad].

$$v(t) = V_{max}\cos(\omega t + \theta) = \Re\left[V_{max}e^{j(\omega t+\theta)}\right] = \Re\left[\frac{V_{max}}{\sqrt{2}}e^{j\theta}e^{j\omega t}\sqrt{2}\right] = \Re\left[\hat{V}e^{j\omega t}\sqrt{2}\right] \quad (1)$$

O símbolo $\hat{V}$ é o fasor associado a $v(t)$, apresentado na Eq. (2) em diversas formas:

$$\hat{V} = \frac{V_{max}}{\sqrt{2}}e^{j\theta} = V_{ef}e^{j\theta} = V_{ef}(cos\,\theta + j\,sin\,\theta) = V_{ef}\angle\theta \quad (2)$$

Note que neste caso o módulo do fasor é definido como sendo o valor eficaz da tensão senoidal, mas ele também pode ser definido pela amplitude da tensão senoidal.

Da mesma forma, uma corrente senoidal será representada por:

$$i(t) = I_{max}\,cos(\omega t + \delta) = \Re\left[\hat{I}e^{j\omega t}\sqrt{2}\right], \quad \text{com } \hat{I} = I_{ef}e^{j\delta} = I_{ef}\angle\delta \quad (3)$$

O uso dos valores eficazes da tensão e da corrente conduz a uma expressão da potência complexa (definida no final deste documento) análoga à expressão da potência em corrente contínua.

Considere agora as duas possibilidades para o sentido da corrente, ilustradas na Figura .

(a) Convenção gerador (b) Convenção receptor (ou carga)

Figura 2 - Convenções de sinal para a corrente.

No caso da Figura 2(a) a corrente sai pelo terminal positivo da tensão; nestas condições, um valor positivo para a potência instantânea, $p(t) = v(t) \cdot i(t)$, indicará que o bipolo está fornecendo potência no instante t. Já no caso da Figura (b), um valor positivo para o mesmo produto indicará que o bipolo está absorvendo potência no instante de tempo t. As duas convenções existem para que possamos trabalhar sempre com valores positivos de potência. Se você ainda acha um pouco confuso utilizar duas convenções, tente pensar em um circuito hidráulico fechado contendo uma bomba e uma turbina. A água sai da bomba pelo seu terminal de alta pressão e entra na turbina também pelo terminal de alta pressão (analogia imediata com os esquemas da Figura 2Figura).

Ao aplicarmos as leis de conservação de potência (conforme será visto mais adiante) é imprescindível saber se as parcelas de potência que são somadas correspondem a potências geradas ou a potências absorvidas.

4. Medição de Potência

Existem duas formas básicas de medição de potência. A primeira é a utilização de um amperímetro e de um voltímetro. A segunda é utilizando um wattímetro. Consideremos uma carga conectada diretamente à rede elétrica monofásica[1] conforme esboço da Figura 2. As Figuras 3 e 4 mostram as duas formas de se medir a potência.

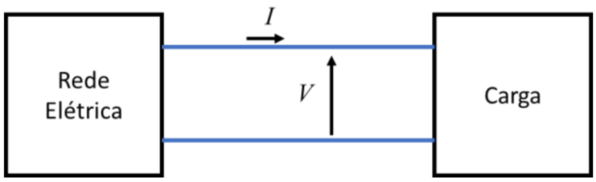

Figura 2 – Carga conectada numa rede elétrica monofásica.

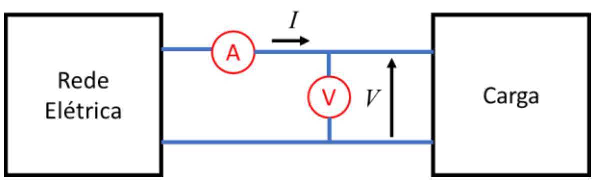

Figura 3 – Medição de potência utilizando amperímetro e voltímetro.

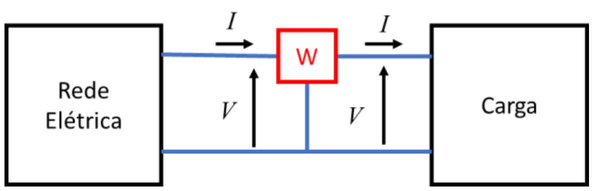

Figura 4 – Medição de potência utilizando wattímetro.

[1] As redes elétricas podem ser monofásicas, bifásicas ou trifásicas. Uma rede monofásica pode ser constituída por 1, 2 ou até mesmo 3 fios. As redes trifásicas podem ter 3 ou 4 fios, sendo que no segundo caso a rede possui o condutor neutro além das 3 fases. Por fim, uma rede bifásica é constituída por duas fases e o neutro.

Fonte: C. C. B. de Oliveira, H. P. Schmidt, N. Kagan e E. J. Robba: *Introdução a sistemas elétricos de potência - componentes simétricas*, Ed. Blücher, 467p, São Paulo, 2000.

Observem que nos dois casos (Fig. 3 e Fig. 4) tanto a corrente (I) quanto a tensão (V) estão sendo mensuradas concomitantemente.

Nesta experiência, utilizaremos um wattímetro digital (Anexo – Manual do Wattímetro tipo Alicate) que pode ser usado tanto para medir potência no modo monofásico como no modo trifásico. Utilizaremos somente o modo monofásico nesta experiência.

A potência elétrica flui da fonte (rede elétrica) para o bipolo passivo (carga), o que no caso das Figuras 2, 3 e 4 trata-se do sentido da esquerda para a direita. Nada impediria, entretanto, que a carga estivesse do lado esquerdo e a fonte do lado direito, e nesse caso a potência fluiria da direita para a esquerda e, consequentemente, a leitura do wattímetro, ainda ligado de forma a medir o fluxo de potência no sentido da esquerda para a direita, forneceria uma leitura negativa.

Conclusão importante: em um circuito elétrico, a potência sempre flui segundo um determinado sentido. Esta conclusão conduz imediatamente à seguinte pergunta:

Como o wattímetro sabe de que lado estão posicionados fonte e carga num circuito?

Uma leitura positiva do wattímetro indicará fluxo de potência da esquerda para a direita. Desta interpretação surge então a possibilidade de que, feitas as ligações, a leitura do wattímetro seja negativa. No entanto, conhecendo-se a localização da fonte e da carga, o sentido do fluxo de potência estará determinado.

5. Potência ativa

A potência ativa (P) é o valor médio da potência instantânea, que flui entre dois pontos de um determinado circuito elétrico, calculado num determinado período e cuja unidade é watts [W].

Para exemplificar, vamos admitir que o bipolo passivo da Figura 2b seja alimentado por tensão senoidal. Sendo o bipolo linear, por ele circulará uma corrente também senoidal. Vamos considerar ainda que as senoides de tensão e corrente sejam representadas pelos fasores indicados nas Eqs. (2) e (3). Da teoria de Circuitos Elétricos sabe-se que a potência ativa (*P*) absorvida pelo bipolo nestas condições será:

$$P = V_{ef} I_{ef} cos(\theta - \delta) = V_{ef} I_{ef}\, cos\, \varphi \tag{4}$$

em que o ângulo φ indica a defasagem entre tensão e corrente neste sentido.

Ao calcularmos a impedância complexa do bipolo, definida como o quociente entre os fasores de tensão e de corrente, $Z = \frac{\hat{V}}{\hat{I}}$ (Z pode ser apresentada em algumas áreas como $\bar{Z}$), φ também é o ângulo desta impedância.

É importante destacar que a definição do ângulo φ implica que bipolos indutivos terão $\varphi > 0$ (tensão adiantada em relação à corrente) e bipolos capacitivos terão $\varphi < 0$ (tensão atrasada em relação à corrente). Já para bipolos resistivos, $\varphi = 0$. Esta informação será muito útil porque a Eq. (4) permite obter somente o módulo do ângulo φ, mas não o seu sinal (note que, pela função cosseno ser par, resulta $\cos\varphi = \cos(-\varphi)$).

Conservação da potência ativa

Sabendo-se que a potência ativa é o valor médio da potência instantânea, para se obter a energia total transferida a um bipolo qualquer durante um determinado intervalo de tempo, basta multiplicar a potência ativa pela duração do referido intervalo. Isto pode ser visto "ao contrário": a potência ativa é a energia total transferida dividida pela duração do intervalo.

O princípio de conservação de energia aplicado a um circuito elétrico garante que, num determinado intervalo de tempo, a energia total introduzida pelas fontes do circuito é igual à energia total absorvida pelos bipolos passivos do circuito. Evidentemente, neste caso o princípio de conservação pode ser enunciado também em termos das potências ativas totais geradas e absorvidas, já que o intervalo de tempo é o mesmo para todos os bipolos. Esta é a prática usual em circuitos elétricos. Assim, para todo circuito elétrico vale sempre que a potência ativa gerada ou fornecida pelas fontes *k* é igual à potência ativa absorvida pelos bipolos passivos *m*, indicado na Eq. (5).

$$\sum_k P_{fontes_k} = \sum_m P_{absorvida_m} \tag{5}$$

A Eq. (5) é conhecida também como conservação da potência ativa.

6. Potência reativa

A partir dos valores de V_{ef}, I_{ef} e P (para um determinado bipolo passivo) não é possível determinar se a natureza deste bipolo é indutiva ou capacitiva. Em outras palavras, está faltando alguma informação quantitativa que permita fazer essa determinação.

Normalmente, a informação faltante é a chamada potência reativa (Q), definida por:

$$Q = V_{ef} I_{ef}\, sen\, \varphi \tag{6}$$

No contexto desta experiência basta considerar a potência reativa apenas como uma entidade abstrata, sem nenhum significado físico particular. Pela definição acima verifica-se facilmente que bipolos passivos de natureza indutiva ($\varphi > 0$) "absorverão" potência reativa ($Q > 0$). As aspas na frase anterior se devem a que, embora a potência reativa seja uma entidade abstrata, os termos "absorver" e "gerar" também podem ser aplicados neste caso (extensão da linguagem).

Já os bipolos passivos de natureza capacitiva ($\varphi < 0$) absorverão potência reativa negativa ($Q < 0$), o que é mais adequadamente enunciado como "os bipolos passivos de natureza capacitiva geram potência reativa". Assim, quando se fala da potência reativa associada a um capacitor subentende-se que se trata de uma potência fornecida, portanto com valor positivo.

Por último, os bipolos puramente resistivos não absorvem nem geram potência reativa ($\varphi = 0$, logo $Q = 0$).

Conclui-se então que, uma vez conhecida a potência reativa absorvida por um bipolo, sua natureza indutiva ou capacitiva estará perfeitamente determinada. A unidade de medida da potência reativa no Sistema Internacional é o volt-ampère reativo [VAr], que é dimensionalmente igual ao watt [W].

A potência reativa pode ser medida utilizando-se os chamados vârmetros, que nada mais são do que wattímetros modificados para fornecer uma leitura proporcional a senφ ao invés de ser proporcional a cosφ. Pode-se medir a potência reativa de forma indireta, aproveitando as Eqs. (4) e (6):

$$P^2 + Q^2 = \left(V_{ef} I_{ef}\right)^2 (cos^2\varphi + sen^2\varphi) = (V_{ef} I_{ef})^2 \quad \therefore \quad Q = \pm\sqrt{(V_{ef} I_{ef})^2 - P^2}. \tag{7}$$

A Eq. (7) mostra que para determinar a potência reativa gerada ou absorvida por um bipolo basta conhecer o valor eficaz da tensão no bipolo, o valor eficaz da corrente que circula nele e a potência ativa que ele gera ou absorve. Note que a Eq. (7) não fornece o sinal da potência reativa; ele é determinado pelo conhecimento prévio da natureza indutiva ou capacitiva do bipolo.

Conservação da potência reativa

Uma segunda (e importantíssima) razão para a definição de potência reativa está no chamado "Teorema de Conservação da Potência Reativa", o qual garante que, em um circuito elétrico, a potência reativa total fornecida pelas fontes e pelos capacitores é igual à potência reativa total absorvida pelos indutores:

$$\sum_k Q_{fontes_k} + \sum_m Q_{capacitores_m} = \sum_n Q_{indutores_n} \tag{8}$$

A Eq. (8) é extremamente útil na resolução de circuitos elétricos em regime permanente senoidal.

Sugestão: procure descobrir o que apareceu primeiro, do ponto de vista histórico: a definição de potência reativa ou o teorema de conservação de uma grandeza que posteriormente foi chamada de "potência reativa".

7. Potência aparente e triângulo de potências

A potência aparente (P_{ap}) é definida como sendo o produto dos valores eficazes de tensão e corrente:

$$\left|P_{ap}\right| = V_{ef} I_{ef} \tag{9}$$

A unidade de potência aparente no Sistema Internacional é o volt-ampère [VA], que também é dimensionalmente igual ao watt.

A potência aparente serve principalmente para especificar a capacidade de equipamentos elétricos. Um exemplo típico são os transformadores. O fator que limita a capacidade de um transformador é sua temperatura de funcionamento. Como o transformador não é um equipamento ideal, ele apresenta perdas de energia quando é conectado à rede. Uma parte dessas perdas depende da corrente de carga de tal forma que, se a corrente for excessiva, as perdas também serão excessivas e a temperatura ultrapassará a temperatura de projeto do transformador, que em geral está situada entre 70 °C e 90 °C. Se o transformador operar o tempo todo na temperatura de projeto, em média ele irá durar a vida útil de projeto, algo em torno de 20 a 30 anos. Porém, se ele operar em temperaturas acima da temperatura de projeto, haverá uma aceleração no processo de degradação dos materiais isolantes, e consequentemente o transformador irá durar bem menos tempo. A curva que relaciona a vida útil dos materiais isolantes com a temperatura é fortemente inversa; como exemplo cita-se a “regra dos 8 °C”: a cada 8 °C a mais de temperatura, a vida útil cai à metade.

Para exemplificar, vamos supor que temos uma geladeira com as seguintes especificações: tensão nominal de 220 V e corrente nominal de 3 A. Vamos então utilizar um transformador 110 V/220 V a uma rede elétrica com tensão nominal de 110 V. Neste caso o transformador deverá ter uma capacidade tal que sua temperatura de projeto não seja excedida para a corrente de carga especificada (3 A no enrolamento secundário, ou 6 A no enrolamento primário). Em vez de especificar a capacidade do transformador através da corrente primária máxima, ou da corrente secundária máxima (o que certamente geraria confusão), especifica-se a capacidade do transformador através da potência aparente:

$$\left|P_{ap_{transf}}\right| = 220 \cdot 3 = 110 \cdot 6 = 660\,VA \tag{10}$$

Assim, no exemplo acima deveremos utilizar um transformador com capacidade igual ou superior a 660 VA. Por fim, note que do ponto de vista das condições térmicas do transformador é a mesma coisa alimentar uma carga puramente indutiva que absorve 3 A, ou uma carga puramente resistiva que absorve 3 A, ou ainda uma carga puramente capacitiva que absorve 3 A. Ou seja, somente o valor eficaz da corrente é relevante para estabelecer o carregamento do transformador.

As Eqs. (4), (6) e (9) podem ser representadas graficamente através do chamado triângulo de potências mostrado na Figura 5. A vantagem desta representação é que todas as relações entre as diferentes potências podem ser obtidas a partir das relações geométricas do triângulo:

$P = V_{ef} I_{ef} cos\varphi = \left|P_{ap}\right| cos\varphi$	$\cos\varphi = \dfrac{P}{\left|P_{ap}\right|}$
$Q = V_{ef} I_{ef} sen\varphi = \left|P_{ap}\right| sen\varphi$	$\mathrm{sen}\varphi = \dfrac{Q}{\left|P_{ap}\right|}$
$\left|P_{ap}\right|^2 = P^2 + Q^2$	$\tan\varphi = \dfrac{Q}{P}$

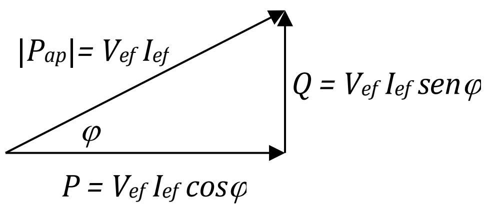

Figura 5 - Triângulo de potências

Potência aparente complexa (P_{ap}):

Note que a potência aparente é uma potência complexa, cuja parte real é a potência ativa e a parte imaginária é a potência reativa, apresentada na Eq. (11).

$$P_{ap} = P + jQ = \left|P_{ap}\right|(cos\,\varphi + j\,sen\,\varphi) = \left|P_{ap}\right|\angle\varphi \tag{11}$$

É importante notar que a potência aparente é apenas um número complexo. Em particular, <u>não é</u>

um fasor, visto que não representa nenhuma grandeza senoidal do tipo $p_{ap}(t) = P_{ap_{max}}(cos\, \omega t + \theta)$!!!

A natureza complexa da potência aparente apenas indica que esta reúne, na mesma entidade, a potência ativa e a potência reativa. Como ambas possuem lei de conservação, resulta que a potência aparente complexa também se conserva:

$$\sum_k P_{ap_{fontes_k}} = \sum_m P_{ap_{absorvida_m}} \tag{12}$$

Observe que, pelo fato da potência aparente ser uma grandeza complexa, não é correto fazer a soma escalar das potências aparentes absorvidas pelos bipolos. Ela deve ser efetuada da seguinte forma:

$$\left|\sum_k P_{ap_{fontes_k}}\right| = \sqrt{\left(\left(\sum_m P_m\right)^2 + \left(\sum_m Q_m\right)^2\right)} \tag{12a}$$

De outra forma, pode-se chegar ao mesmo resultado, por meio dos fasores de tensão e corrente associados a um determinado bipolo. Calcula-se a potência aparente complexa (do referido bipolo) a partir da expressão (13).

$$\hat{V}\hat{I}^* = V_{ef}\angle\theta \cdot I_{ef}\angle-\delta = V_{ef}I_{ef}\angle\varphi = V_{ef}I_{ef}(cos\,\varphi + j\,sen\,\varphi) = P + jQ = P_{ap} \tag{13}$$

$$P_{ap} = \hat{V}\hat{I}^*$$

Note que na Eq. (13) utiliza-se o complexo conjugado do fasor da corrente; caso contrário, os ângulos θ e δ resultariam somados, o que não tem nenhum significado físico.

Se houver “n” bipolos no circuito, então:

$$P_{ap} = \sum_i^n P_i + j\sum_i^n Q_i \tag{13a}$$