COMPONENTES DE POTÊNCIA EM CIRCUITOS ELÉTRICOS MONOFÁSICOS NÃO-SENOIDAIS

Walmeran José Trindade Júnior
Escola Técnica Federal da Paraíba
Av. 1° de Maio, 720 - Jaguaribe
58.015-430 - João Pessoa - Paraíba - Brasil
e-mail : walmeran@jpa.etfpb.br

Resumo

Neste trabalho são mostradas as principais definições para as componentes de potência em circuitos elétricos monofásicos, operando em condições não-senoidais de tensão e/ou corrente. A evolução histórica das definições, os seus significados físicos, bem como as suas vantagens e desvantagens são descritas. Maior ênfase é dada às definições de Budeanu, Fryze e Czarnecki, pois as duas primeiras serviram de base para as definições de Czarnecki que, atualmente, apresentam o maior respaldo entre os pesquisadores do tema, tanto pela simplicidade e elegância do modelamento matemático, quanto pela coerência do significado físico das definições.

1. Introdução

Devido à crescente proliferação de cargas não-lineares, principalmente as de eletrônica de potência, os sistemas elétricos, cada vez mais, estão recebendo grandes injeções de correntes harmônicas que provocam, entre outros efeitos, distorção de tensão. Assim, as tensões e/ou correntes desses sistemas deixam de ter forma-de-onda senoidal [1].

Nessa nova realidade, ou seja, circuitos elétricos operando em condições não-senoidais, novas definições de potência devem ser desenvolvidas, pois essas definições são utilizadas no gerenciamento da energia, na compensação de cargas ou na tarifação. Além de novas definições, a instrumentação também deve ser revista, pois os medidores de potência e energia convencionais apresentam erros consideráveis quando utilizados em condições não-senoidais [3].

As definições para potência ativa, reativa e aparente para condições senoidais e seus respectivos significados já são bastante conhecidas e compreendidas pelos engenheiros que trabalham na geração, transmissão, distribuição e utilização da energia elétrica. Porém, em condições não-senoidais, as definições de potência não são ainda aceitas de forma unânime, existindo acirrados debates envolvendo renomados cientistas que propõem suas definições e criticam as existentes.

2. Componentes de Potência em Sistemas Monofásicos :

2.1 Em Condições Senoidais :

A potência instantânea ($p(t)=v(t).i(t)$), que é a taxa com que a energia elétrica é transmitida do ou para o circuito, tem duas componentes chamadas componente unidirecional $p_u(t)$ e componente oscilatória $p_r(t)$. Ou seja,

$$p(t) = p_u(t) + p_r(t) \quad (1)$$

O valor médio da componente unidirecional $p_u(t)$ é chamado potência ativa P. A potência ativa P é a potência útil ou real que é transferida da fonte para a carga e que pode realizar trabalho.

A amplitude da componente oscilatória $p_r(t)$ é chamada potência reativa Q. A potência reativa não realiza trabalho, ou seja, não transfere energia para a carga, fica oscilando entre a fonte e a carga devido a presença de elementos reativos.

A potência aparente (S=V.I, V e I valores rms de tensão e de corrente) é uma figura de mérito que informa a máxima capacidade de transferência de potência de um circuito elétrico. A potência aparente S pode também ser calculada pela soma geométrica das potências ativa e reativa.

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \qquad (4)$$

Desse modo, podemos interpretar a potência reativa

$$Q^2 = S^2 - P^2 \qquad (5)$$

como a parte da potência aparente S que não é utilizada pela carga. Assim, se a potência reativa for minimizada ou anulada será alcançado o máximo na transferência de energia entre a fonte e a carga.

A eficiência na transferência da energia da fonte para a carga, ou seja, a eficiência na utilização de um sistema elétrico é expressa no fator de potência FP.

$$FP = \frac{P}{S} = \cos\varphi \qquad (6)$$

2.2. Em Condições Não-Senoidais:

Quando as formas-de-onda da tensão e da corrente não são senoidais, mas ainda periódicas, as potências ativa P e aparente S continuam tendo o mesmo significado, quando da condição senoidal. Mas a diferença (5) entre as potências aparente e ativa não pode mais ser interpretada como a amplitude da componente oscilatória da potência instantânea. A decomposição (1) não existe em condições não-senoidais [2].

Assumindo que a tensão e a corrente num circuito não-senoidal são dadas por

$$v(t) = \sum_n \sqrt{2} V_n \operatorname{sen}(n\omega t + \alpha_n) \qquad (7)$$

$$i(t) = \sum_n \sqrt{2} I_n \operatorname{sen}(n\omega t + \beta_n) \qquad (8)$$

onde : V_n e I_n são os valores rms das tensões e correntes harmônicas, respectivamente, e α_n e β_n são os ângulos de fase das tensões e correntes harmônicas, respectivamente.

Os valores rms totais da tensão e da corrente são :

$$\|v\| = \sqrt{\sum_n V_n^2} \qquad (9)$$

$$\|i\| = \sqrt{\sum_n I_n^2} \qquad (10)$$

A potência ativa desse circuito será :

$$P = \sum_n V_n I_n \cos(\theta_n) \qquad (11)$$

com $\theta_n = \alpha_n - \beta_n$.

ou seja, a potência ativa total é a soma da potência ativa de cada harmônico. A potência ativa obedece ao princípio da conservação da energia [4][5].

A potência aparente não obedece o princípio da conservação da energia, ou seja :

$$S = \|v\|\|i\| = \sqrt{\sum_n V_n^2}\sqrt{\sum_n I_n^2} \qquad (12)$$

$$S \neq \sqrt{\sum_n V_n^2 I_n^2} \qquad (13)$$

A potência aparente continua tendo a mesma definição para o caso senoidal e o seu significado é o mesmo, ou seja, representa a capacidade máxima de transferência de energia entre fonte e carga.

Em condições não-senoidais, a diferença ($S^2 - P^2$) tem uma natureza complexa. Este termo é tradicionalmente chamado de potência reativa. Mas para evitar confusões, quando em condições não-senoidais, o mesmo será chamado potência não-ativa (deactive power) T, ou seja,

$$T = \sqrt{S^2 - P^2}$$

(14)

Sobre a potência não-ativa T algumas questões são importantes para o entendimento físico do comportamento de um circuito não-senoidal, quais sejam :

i. Como as propriedades e os parâmetros da carga afetam a potência não-ativa T quantitativamente?

ii. Como e que medida pode ser tomada para minimizá-la?

Uma vez que a potência não-ativa T é uma grandeza intrinsecamente complexa, a resposta para essas questões requer a decomposição de T em componentes elementares [2].

Ao longo da História, vários pesquisadores fizeram propostas para as definições de potência para condições não-senoidais, inclusive com a decomposição da potência não-ativa T. Essas definições seguem duas linhas de abordagem. A primeira, iniciada por Budeanu, faz a abordagem através da aplicação da série de Fourier nas definições de potência, chamada de abordagem no domínio da freqüência. A segunda linha, iniciada por Fryze, não utiliza a série de Fourier em suas definições (abordagem no domínio do tempo) [6].

2.2.1 Definição de Budeanu :

A definição de potência sugerida por Budeanu em 1927 é a mais conhecida decomposição da potência aparente. Ela tem a forma :

$$S^2 = P^2 + Q_B^2 + D_B^2 \quad (15)$$

Com as definições de Budeanu para potência reativa e potência de distorção sendo :

$$Q_B = \sum_n V_n I_n \operatorname{sen}\varphi_n \quad (16)$$

$$D_B = \sqrt{S^2 - P^2 - Q_B^2} \quad (17)$$

A potência reativa Q_B é interpretada como a potência não usada pela carga devido ao fluxo de energia oscilatório, enquanto a potência de distorção D_B é interpretada tal como uma carga devido à distorção das formas-de-onda da tensão e da corrente. É mostrado em [8] que essas interpretações não são corretas. O fluxo de energia oscilatório pode existir no circuito, mesmo que a potência reativa Q_B seja zero.

Outra falha na definição de Budeunu é que não existe relação entre a potência de distorção D_B e a distorção das formas-de-onda da tensão e da corrente. A potência de distorção D_B pode ser zero mesmo com as formas de onda distorcidas, mas pode ser diferente de zero mesmo que as formas-de-onda da tensão e da corrente sejam as mesmas.

Além desses erros de interpretação, a compensação da potência reativa Q_B definida por Budeanu não eleva o fator de potência do circuito para 1,0.

Assim, as definições de potência sugeridas por Budeanu não só levam a erros de interpretação das propriedades de potência de um circuito, mas também não podem ser usadas para projetar compensadores de reativos [2].

2.2.2 Definição de Fryze :

A definição de potência sugerida por Fryze em 1931 é baseada na decomposição da corrente em duas componentes ortogonais no domínio do tempo, ou seja, sem o uso da série de Fourier. Ele definiu uma corrente ativa i_a como uma componente da corrente i que tem a mesma forma-de-onda da tensão e o seu valor rms $\|i_a\|$ é mínimo valor necessário para a transmissão da potência ativa P para a carga. Assim,

$$i_a(t) = \frac{P}{\|v\|^2} v(t) \quad (18)$$

A parte restante da corrente i é :

$$i_b(t) = i(t) - i_a(t) \quad (19)$$

a componente i_b é a parte da corrente i que não é utilizada pela carga.

Uma vez que essas duas componentes i_a e i_b são ortogonais, isto é, o produto escalar $(i_a, i_b)=0$, então :

$$\|i\|^2 = \|i_a\|^2 + \|i_b\|^2 \quad (20)$$

Multiplicando a Equação (20) por $\|v\|^2$, a equação de potência resultante é:

$$S^2 = P^2 + Q_F^2 \quad (21)$$

Com a definição de Fryze para a potência reativa sendo,

$$Q_F = \|v\|\|i_b\| \quad (22)$$

De acordo com a definição de Fryze, a potência reativa em circuitos não-senoidais é idêntica à potência não-ativa T definida pela Equação (14).

A definição de Fryze para a potência reativa Q_F foi muito vantajosa para a instrumentação da época, pois a medição dos harmônicos de tensão e de corrente, com suas respectivas fases era muito difícil para a tecnologia existente.

Por outro lado, a definição de Q_F não relaciona a potência reativa com as propriedades da carga. Ela só fornece uma medida da sobrecarga da fonte. As razões para isso não são identificadas [2]. Além disso, a potência reativa Q_F não dá nenhum subsídio para o projeto de compensadores reativos. Porém, Q_F é totalmente compensada, quando uma corrente $-i_b$ é injetada no circuito, mas um simples compensador como um banco de capacitores não pode ser projetado baseado na equação de Fryze.

2.2.3 Definição de Czarnecki :

Após a análise de várias definições de potência para condições não-senoidais [2], Czarnecki desenvolveu as suas definições separando-as em dois grupos : circuitos lineares e invariantes no tempo, e circuitos não-lineares e/ou variantes no tempo.

2.2.3.1 Circuitos Lineares e Invariantes no Tempo :

A forma-de-onda da corrente em um circuito linear e invariante no tempo só pode ser não-senoidal se a tensão tiver essa característica. Nesse caso, o conjunto de harmônicas da corrente será idêntico ao da tensão.

Seja um circuito cuja carga apresenta uma admitância para cada freqüência harmônica igual a :

$$\overline{Y}_n = Y_n e^{-j\varphi_n} = G_n + jB_n \quad (23)$$

Então, a corrente da carga será :

$$i = G_0 V_0 + \sqrt{2}\,\mathrm{Re}\sum_n \overline{Y}_n \overline{V}_n e^{jn\omega t} \quad (24)$$

com $\overline{V}_n = V_n e^{j\alpha_n}$.

A potência ativa P será suprida à carga, cuja condutância equivalente é :

$$G_e = \frac{P}{\|v\|^2} \quad (25)$$

Essa condutância G_e drena uma corrente i_a da fonte,

$$i_a = G_e v \quad (26)$$

A componente restante da corrente i

$$i - i_a = (G_0 - G_e)V_0 + $$

$$+\sqrt{2}\,\mathrm{Re}\sum_n (\overline{Y}_n - G_e)\overline{V}_n e^{jn\omega t} \quad (27)$$

contém duas outras componentes

$$i_s = (G_0 - G_e)V_0 +$$

$$+\sqrt{2}\,\mathrm{Re}\sum_n (G_n - G_e)\overline{V}_n e^{jn\omega t} \quad (28)$$

$$i_r = \sqrt{2}\,\mathrm{Re}\sum_n jB_n \overline{V}_n e^{jn\omega t} \quad (29)$$

Ou seja, a corrente da fonte i pode ser expressa como :

$$i = i_a + i_s + i_r \quad (30)$$

As componentes i_a, i_s e i_r são chamadas respectivamente de : corrente ativa, corrente dispersão e corrente reativa.

É mostrado em [6] que essas três componentes de i são ortogonais, assim:

$$\|i\|^2 = \|i_a\|^2 + \|i_s\|^2 + \|i_r\|^2 \quad (31)$$

com,

$$\|i_a\| = \frac{P}{\|v\|} \quad (32)$$

$$\|i_s\| = \sqrt{\sum_n (G_n - G_e)^2 V_n^2} \quad (33)$$

$$\|i_r\| = \sqrt{\sum_n B_n^2 V_n^2} \quad (34)$$

Uma vez que a susceptância B_n está relacionada com a potência reativa harmônica Q_n como segue,

$$Q_n = V_n I_n \,\mathrm{sen}\varphi_n = -V_n^2 B_n \quad (35)$$

então, a Equação (34) pode ser escrita como:

$$\|i_r\| = \sqrt{\sum_n Q_n^2 / V_n^2} \quad (36)$$

Da Equação (31) resulta :

$$S^2 = P^2 + D_s^2 + Q_r^2 \quad (37)$$

com,

$$S = \|v\|\|i\| \qquad P = \|v\|\|i_a\| \quad (38)$$

$$D_s = \|v\|\|i_s\| \qquad Q_r = \|v\|\|i_r\| \quad (39)$$

sendo S a potência aparente, P a ativa, D_s a de dispersão e Q_r a reativa.

Essa definição de Czarnecki, como se vê, é baseada na decomposição da corrente em três componentes (i_a, i_s e i_r) ortogonais. Isto propicia uma clara interpretação das propriedades físicas envolvidas num circuito não-senoidal. Porém, é necessário que sejam conhecidos os fasores de tensão $\overline{V}_n$ e a admitância da carga para cada freqüência harmônica $\overline{Y}_n$.

Assim, as Equações (31) até (34) mostram que só existem duas razões para a corrente rms da fonte $\|i\|$ aumentar além da corrente rms ativa $\|i_a\|$, que é necessária para a transmissão da potência ativa P, em um circuito linear e invariante no tempo com formas-de-onda não-senoidal:

(i) Variação da condutância G_n em torno da condutância equivalente G_e. O Valor rms $\|i_s\|$ da corrente i_s dá uma medida desse aumento.

(ii) O fluxo de energia oscilatória para cada freqüência harmônica. O valor rms $\|i_r\|$ da corrente i_r dá uma medida desse aumento. Essa corrente não vai existir, se e somente se, todas as potências reativas harmônicas Q_n forem nulas, isto é, não existindo fluxo de energia oscilatória no circuito.

A decomposição apresentada também traz outra importante informação, com respeito à possibilidade da redução da potência não-ativa T, através de compensador reativo shunt. Esse compensador não afeta as condutâncias G_n e G_e, isto é, ele não afeta as correntes i_a e i_s. O compensador modifica somente o valor rms $\|i_r\|$ da corrente reativa i_r.

Se B_{xn} denota a susceptância do compensador, então tal compensador conectado aos terminais da carga modifica o valor $\|i_r\|$ para

$$\|i_r\| = \sqrt{\sum_n (B_n + B_{xn})^2 V_n^2} \qquad (40)$$

Isto faz com que seja possível uma compensação total da corrente reativa i_r. Para isso, o compensador seja projetado de modo que $B_{xn} = -B_n$.

A potência de dispersão D_s, não pode ser compensada por elementos reativos. Uma solução para isso seria através de filtros.

2.2.3.2 Circuitos Não-Lineares e/ou Variantes no Tempo :

As distorções nas formas-de-onda nesses circuitos são causadas não somente pelas harmônicas da fonte de tensão, mas também pelas harmônicas originadas na carga devido a não-linearidade e/ou variação periódica dos seus parâmetros.

Essencial para qualquer análise de fluxo de potência em tais circuitos é a separação das ordens das harmônicas geradas pela carga das existentes na fonte de tensão [2].

As correntes harmônicas originadas na carga de ordem k, mas não presentes no conjunto de harmônicas da tensão podem ser somadas como :

$$i_h = \sqrt{2}\,\mathrm{Re}\sum_k \overline{I}_k e^{jk\omega t} \qquad (41)$$

onde $\overline{I}_k = I_k e^{j\beta_k}$.

As correntes harmônicas restantes, ou seja, de mesma ordem das harmônicas de tensão podem ser calculadas por :

$$\frac{\overline{I}_n}{\overline{V}_n} = \overline{Y}_n = G_n + jB_n \qquad (42)$$

A corrente $i - i_h$ pode ser decomposta da mesma maneira que a corrente da fonte nos circuitos lineares. Assim, a corrente da fonte i pode ser apresentada como :

$$i = i_a + i_s + i_r + i_h \qquad (43)$$

As correntes i_a, i_s e i_r têm as mesmas propriedades que elas tinham nos circuitos lineares, porém, são ortogonais com relação à corrente i_h [2], uma vez que elas não têm harmônicas de mesma ordem. Então,

$$\|i\|^2 = \|i_a\|^2 + \|i_s\|^2 + \|i_r\|^2 + \|i_h\|^2 \qquad (44)$$

com os valores $\|i_a\|, \|i_s\|, \|i_r\|$ definidos como nos circuitos lineares e

$$\|i_h\| = \sqrt{\sum_k I_k^2} \qquad (45)$$

A equação de corrente para os circuitos não-lineares e/ou variantes no tempo difere da mesma equação para os circuitos lineares pelo termo i_h. Este termo é chamado corrente harmônica. A equação de potência tem a forma :

$$S^2 = P^2 + D_s^2 + Q_r^2 + D_h^2 \qquad (46)$$

com as potências D_s e Q_r definidas previamente e

$$D_h = \|v\|\|i_h\| \qquad (47)$$

chamada de potência harmônica.

3. Conclusão :

As definições de potência e a condição de operação dos circuitos elétricos servem de base para o projeto de instrumentos de medição de grandezas elétricas, para o gerenciamento da energia elétrica e para tarifação.

Em condições senoidais, as definições de potência são consagradas e os seus significados físicos largamente aceitos. Porém, em condições não-senoidais ainda existem discussões acerca da melhor definição para as componentes de potência nessas condições.

Desde a definição de Budeanu, passando pela de Fryze, até chegarmos na de Czarnecki um longo caminho foi percorrido. E nele, foi surgindo um entendimento quanto aos conceitos físicos que envolvem os circuitos elétricos operando em condições não-senoidais.

A definição proposta por Czarnecki aliou a abordagem do domínio da freqüência (série de Fourier) utilizada por Budeanu na decomposição da potência não-ativa T à abordagem do domínio do tempo, utilizada por Fryze na decomposição da corrente da fonte em duas componentes ortogonais.

Com isso, a definição de Czarnecki mostra-se coerente matemática e fisicamente, pois, com ela é possível entender as propriedades físicas dos circuitos não-senoidais, bem como projetar compensadores para reduzirem a potência não-ativa T, melhorando o uso da energia em tais circuitos.

4. Referências Bibliográficas :

[1] FILIPSKI, P. S. et al. **Evaluation of Reactive Power Meters in the Presence of high Harmonic Distortion,** IEEE Trans. Power Deliv., vol. 7, no. 4, October, 1992.

[2] CZARNECKI, L. S. **Comparison os Power Definitions for Circuits with Nonsinusoidal Waveforms,** IEEE Tutorial Course, Nonsinusoidal Situations Effects on the Performance of Meters and Definitions of Power,pp. 43-50, New York, 1990.

[3] ARSENEAU, R. et al. **Nonsinusoidal Situations : Effects on the Performance of Meters and Definitions of Power.** IEEE Tutorial Course, August, 1990.

[4] COX, M. D. et al. **A Review of Powers According to the IEEE Standard Dictionary,** IEEE Tutorial Course, Nonsinusoidal Situations : Effects on the Performance of Meters and Definitions of Power, pp. 31-36, New York, 1990.

[5] SHEPHERD, W. et al. **Energy Flow and Power Factor in Nonsinusoidal Circuits,** Cambridge University Press, London, 1979.

[6] CZARNECKI, L. S. **Considerations on the Reactive Power in Nonsinusoidal Situations,** IEEE Trans. Instr. Meas., vol. IM-34, no. 3, pp. 399-404, September, 1985.

[7] EMANUEL, A. E. **Powers in Nonsinusoidal Situations : A Review of Definitions and Physical Meaning,** IEEE Trans. Power Deliv., vol. 5, no. 3, pp. 1377-1389, July, 1990.

[8] CZARNECKI, L. S. **What is Wrong with the Budeanu Concept of Reactive and Distortion Power and Why It Should be Abandoned,** IEEE Trans. Instr. Meas., vol. IM-36, no. 3, pp. 399-404, September, 1987.