Práticas de Eletricidade e Eletrônica - 2023

Experiência 4 - **CIRCUITOS TRIFÁSICOS**

1. Objetivos

Familiarização com o sistema trifásico; medida de grandezas de linha e de fase.

Ligação estrela e ligação triângulo.

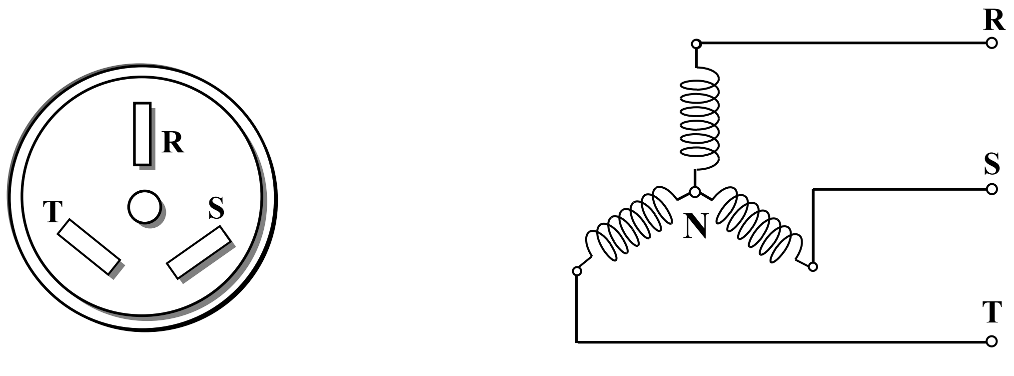
Medida da potência em trifásico.

Medida e correção de fator de potência em circuito trifásico.

2. Introdução

2.1 - Grandezas de fase e grandezas de linha

Nesta experiência várias cargas trifásicas serão ligadas a uma fonte trifásica, constituindo um sistema trifásico. Este sistema será examinado experimentalmente, obtendo-se assim uma base concreta para o estudo teórico dos sistemas trifásicos.



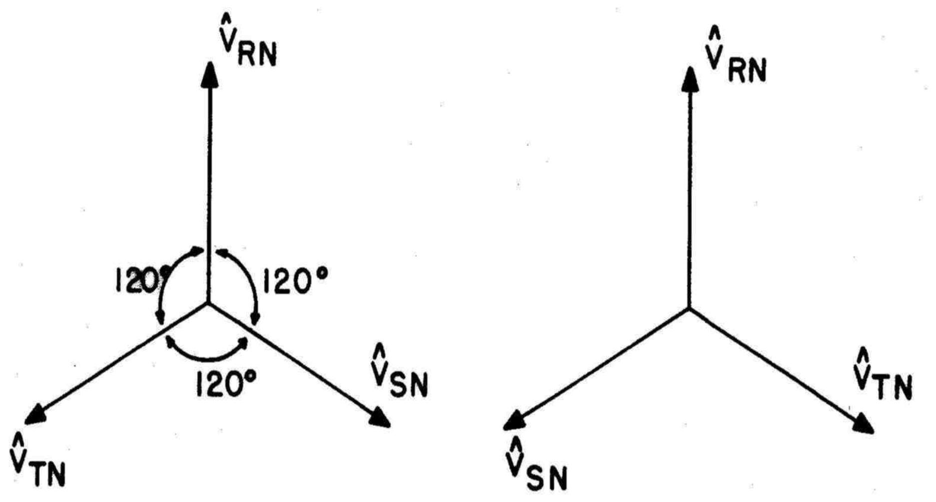
(a) (b)

Figura 1

Como fontes trifásicas, serão utilizadas as tomadas trifásicas do laboratório. Estas tomadas têm o aspecto indicado na figura 1,a (a menos das letras indicadas) e podem ser consideradas como alimentadas pelo secundário de um transformador trifásico ligado em estrela, como indicado na figura 1,b.

Três terminais das bobinas secundárias deste transformador são ligados diretamente ao neutro da instalação que, por sua vez, é ligado à terra. Os outros terminais das bobinas vão ligados, respectivamente, às linhas R, S e T. O neutro não está disponível na tomada trifásica, mas poderá ser alcançado nas tomadas monofásicas do mesmo quadro.

Se o trifásico for <u>simétrico</u> os valores eficazes das três <u>tensões de fase</u>, $\hat{V}_{RN}$, $\hat{V}_{SN}$ e $\hat{V}_{TN}$ são exatamente iguais e cada tensão está defasada 120° das demais. Há, portanto, duas possibilidades para os diagramas fasoriais destas três tensões, como indicado na figura 2,a e b.



(a) **(b)**

Figura 2

No caso da figura 2,a diz-se que a seqüência de fase é <u>positiva</u>, ao passo que a figura 2,b corresponde à seqüência de fases <u>negativa</u>.

As <u>tensões de linha</u> são as tensões entre os pinos da tomada trifásica. Pela segunda lei de Kirchhoff teremos

(1) $$\begin{cases} \hat{V}_{RS} = \hat{V}_{RN} - \hat{V}_{SN} \\ \hat{V}_{ST} = \hat{V}_{SN} - \hat{V}_{TN} \\ \hat{V}_{TR} = \hat{V}_{TN} - \hat{V}_{RN} \end{cases}$$

Estas relações estão indicadas na figura 3, na hipótese de seqüência de fases positiva. É fácil verificar por esse diagrama fasorial que, no trifásico simétrico, os valores eficazes de tensão de linha V_ℓ e tensão de fase V_f estão relacionados por

(2) $$V_\ell = \sqrt{3}.V_f$$

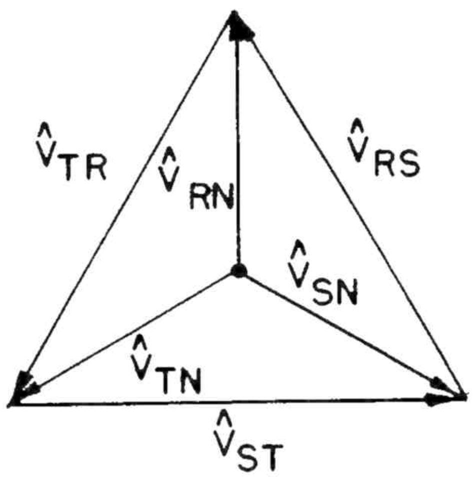
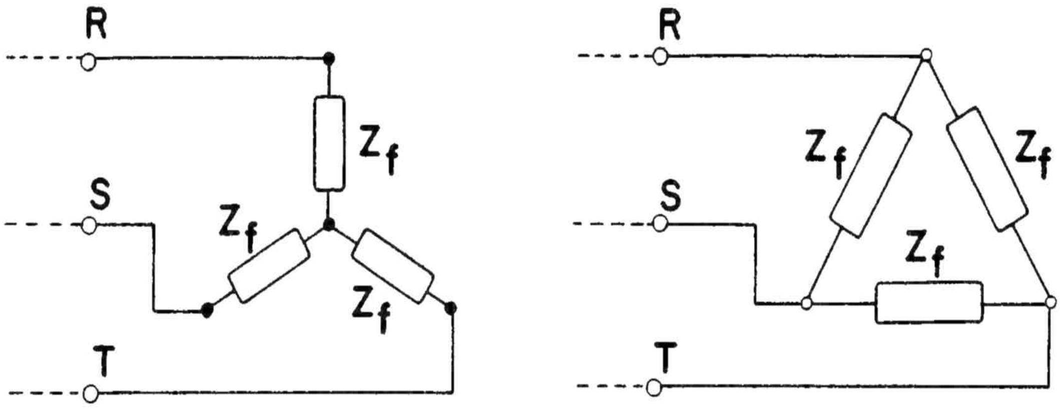


Figura 3

As três tensões, $\hat{V}_{RS}$, $\hat{V}_{ST}$ e $\hat{V}_{TR}$ constituem um sistema trifásico simétrico de tensões, também com seqüência positiva.

Consideremos agora a ligação à nossa fonte trifásica simétrica de uma carga trifásica equilibrada, ou seja, de uma carga constituída por três impedâncias Z_f iguais. Estas cargas podem também ser ligadas em estrela ou em triângulo, como indicado, respectivamente, nas figuras 4a, e 4b.



(a) **(b)**

Figura 4

As grandezas de linha agora serão medidas nos ou entre os fios de linha, indicados em pontilhado na figura 4. As grandezas de fase serão as tensões ou correntes medidas nas impedâncias de fase.

Verifica-se que, no caso de um trifásico simétrico e equilibrado, valem as seguintes relações entre valores eficazes das grandezas de linha (índice ℓ) e das grandezas de fase (índice f):

- carga em estrela:

$$(3) \qquad \begin{cases} V_f = V_\ell / \sqrt{3} \\ I_f = I_\ell \end{cases}$$

- carga em triângulo:

$$(4) \qquad \begin{cases} V_f = V_\ell \\ I_f = I_\ell / \sqrt{3} \end{cases}$$

A mudança da ligação da carga de estrela para triângulo, ou vice-versa, pode ser feita por uma chave de 3 pólos e duas posições, chamada chave estrela-triângulo. Esta chave será examinada na parte prática.

Foi mostrado no curso de Circuitos Elétricos que a potência ativa num sistema trifásico simétrico e equilibrado é dada por

$$(5) \qquad P = \sqrt{3}\, V_\ell\, I_\ell \,.\, \cos\varphi \qquad (\,watt\ ou\ kW\,)$$

ao passo que a potência reativa é

$$(6) \qquad Q = \sqrt{3}\, V_\ell\, I_\ell \,.\, sen\,\varphi \qquad (\,VAr\ ou\ KVAr\,)$$

tanto para ligação estrela como para triângulo.

Em ambas as fórmulas, φ é a defasagem entre corrente e tensão na fase da carga.

Além dos sistemas trifásicos simétricos e equilibrados, podemos ter também trifásicos assimétricos e desequilibrados, em que as tensões não têm exatamente o mesmo módulo ou defasagem de 120°, ou as impedâncias de fase não são exatamente iguais. Perde-se então a simetria do sistema e os cálculos correspondentes ficam muito mais complicados.

Na prática faz-se o possível para que os trifásicos sejam simétricos e equilibrados na situação de operação normal. Evidentemente simetria e equilíbrio perfeitos não podem ser obtidos e pequenos afastamentos em relação ao caso ideal são inevitáveis. Normalmente estas pequenas assimetrias podem ser desprezadas e o circuito pode ser calculado como sendo simétrico e equilibrado. Já em situações anormais (existência de curtos, fases abertas, desequilíbrio de fases, etc...) essa aproximação não é válida, devendo-se recorrer a técnicas de fasores ou de componentes simétricas.

Nesta experiência será considerada apenas a aproximação correspondente à simetria e equilíbrio.

2.2 - Medida de potência trifásica

A potência nos sistemas trifásicos a três fios pode ser medida por dois wattímetros, ligados como indicado na figura 5, quer o sistema seja simétrico e equilibrado ou não (Teorema de Blondel [4]).

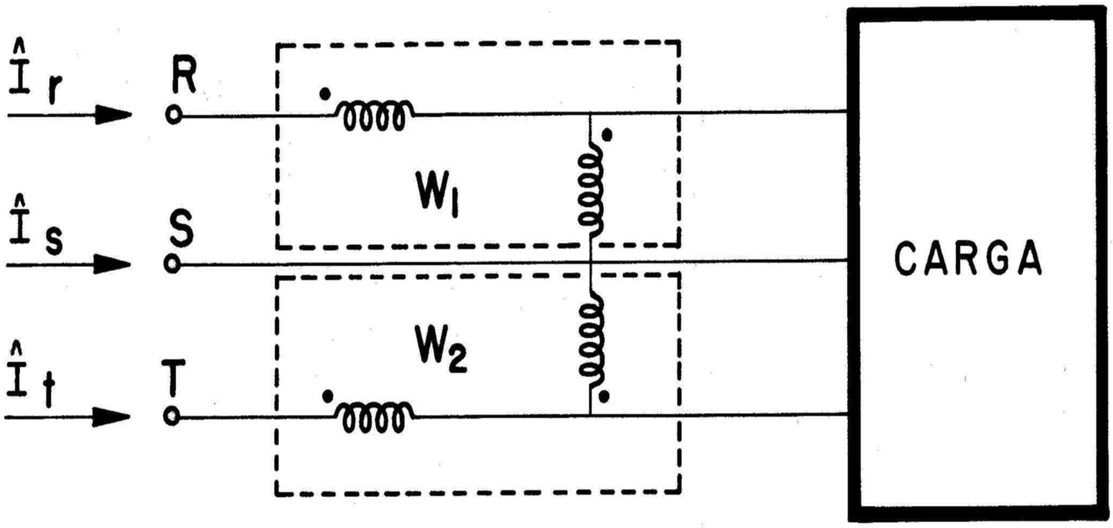


Figura 5

Demonstra-se que a potência total absorvida pela carga trifásica é

(7) $$P = W_1 + W_2$$

onde W_1 e W_2 são as indicações dos wattímetros. Note-se que se a ligação dos wattímetros for feita obedecendo às indicações de polaridade, como mostrado na figura, W_1 ou W_2 podem resultar negativas. Neste caso o sinal algébrico deverá ser levado em conta na aplicação da (7).

Se o sistema trifásico for simétrico e equilibrado, demonstra-se que as indicações dos dois wattímetros são dadas por

(8) $$\begin{cases} W_1 = V_\ell \, . \, I_\ell \, . \cos(\varphi + 30^\circ) \\ W_2 = V_\ell \, . \, I_\ell \, . \cos(\varphi - 30^\circ) \end{cases}$$

onde $\cos\varphi$ é novamente o fator de potência da carga, isto é, a defasagem entre corrente e tensão numa de suas fases.

Das expressões (8) conclui-se que:

a) para $\cos\varphi = 1$, ou $\varphi = 0°$, os dois wattímetros dão leituras iguais;

b) para $\cos\varphi = 0{,}5$, ou $\varphi = 60°$, um dos wattímetros dá leitura nula e o outro indica toda a potência absorvida pela carga;

c) para $\cos\varphi < 0{,}5$, ou $|\varphi| > 60°$, um wattímetro dá deflexão no sentido normal e outro deflete no sentido inverso. Caso a medida seja feita com um aparelho analógico, a bobina de potencial (ou, eventualmente a bobina de corrente) deste aparelho deve ser invertida para obter uma leitura, que será afetada do sinal menos.

Em vez de se usar dois wattímetros monofásicos, como indicado na figura 5, é possível fazer a medida da potência num trifásico de três fios com um único <u>wattímetro trifásico</u>, como o que será utilizado nesta experiência. A indicação do wattímetro trifásico será correta **<u>apenas</u>** para sistemas simétricos e equilibrados, já que seu princípio de funcionamento é baseado nesta hipótese.

2.3 - <u>Definição e cálculo do fator de potência</u>

O <u>fator de potência</u> de um circuito trifásico qualquer (em geral não simétrico e desequilibrado) define-se por

(9) $$fp \triangleq \frac{P_T}{\sqrt{P_T^2 + Q_T^2}}$$

onde P_T e Q_T indicam, respectivamente, a potência ativa e a potência reativa totais no trifásico. Convém relembrar que P_T será sempre positivo, ao passo que Q_T pode ser positivo ou negativo, conforme a carga seja indutiva ou capacitiva.

Se o trifásico for simétrico e equilibrado, valem

(10) $$\begin{cases} P_T = \sqrt{3}\, V_\ell\, I_\ell .\cos\varphi \\ Q_T = \sqrt{3}\, V_\ell\, I_\ell .sen\,\varphi \end{cases}$$

de modo que, por aplicação na definição (9), resulte

(11) $$fp = \cos\varphi$$

isto é, o fator de potência torna-se igual ao cosseno da defasagem entre corrente e tensão numa das fases da carga.

Como já foi visto, no caso do trifásico a 3 fios a potência ativa pode ser medida pelos métodos dos dois wattímetros. Usando este método e sendo o trifásico simétrico e equilibrado, as indicações dos dois wattímetros serão:

(12) $$\begin{cases} W_1 = V_\ell\, I_\ell \cos\left(\varphi + 30^\circ\right) \\ W_2 = V_\ell\, I_\ell \cos\left(\varphi - 30^\circ\right) \end{cases}$$

A partir destas expressões demonstra-se que o fator de potência pode ser calculado por

(13) $$\cos\varphi = \left[\frac{1}{1 + 3(1-a)^2 \big/ (1+a)^2} \right]^{1/2}$$

onde

(14) $$a = \frac{\min\left(W_1 , W_2\right)}{\max\left(W_1 , W_2\right)}$$

Verifica-se também que a tangente da defasagem é dada por

(15) $$tg\varphi = \sqrt{3}\,\frac{W_2 - W_1}{W_2 + W_1}$$

As expressões (13) e (14) ou (15) permitem então o cálculo do fator de potência do trifásico a partir das leituras dos dois wattímetros.

2.4 - Medida do fator de potência nos trifásicos simétricos e equilibrados

A medida do fator de potência nos circuitos trifásicos simétricos e equilibrados pode ser feita medindo-se o fator de potência de uma fase qualquer, ou pela expressão:

$$fp = \frac{P_T}{\sqrt{3}\,V_\ell\, I_\ell}\,.$$

2.5 - Correção do fator de potência

Normalmente as instalações elétricas industriais são indutivas. Se o seu fator de potência for baixo (menor que 0,92) poderá ser economicamente interessante fazer a correção do fator de potência. Esta correção se realiza associando ao trifásico uma carga constituída por três capacitores, ligados em estrela ou em triângulo, como indicado na figura 6 .

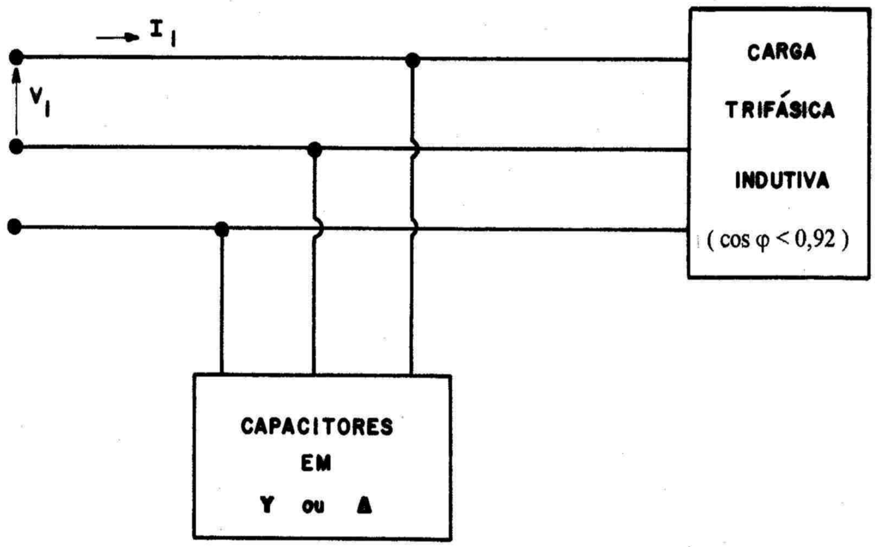


Figura 6

Os capacitores absorverão uma potência reativa de sinal oposto à da carga trifásica, reduzindo assim a potência reativa total do sistema e melhorando seu fator de potência. Por outro lado, os capacitores praticamente não consomem potência ativa.

Vejamos como determinar as capacitâncias dos capacitores para fazer a correção do fator de potência. Seja então $\cos\varphi_1$, o fator de potência da carga trifásica; nesta carga temos então as potências ativa e reativa.

$$P_1 = \sqrt{3}\,.\,V_\ell\,.I_\ell\,.\cos\varphi_1$$

$$Q_1 = \sqrt{3}\,.\,V_\ell\,.I_\ell\,.sen\,\varphi_1$$

(positivo para circuito indutivo)

Dividindo membro a membro, obtemos

(16) $$Q_1 = P_1\,.\,tg\varphi_1$$

Suponhamos que se deseja um fator de potência corrigido $\cos\varphi_2$ (=0,85 indutivo, por exemplo). Como a potência ativa não muda com a ligação dos capacitores, vamos ter, para o sistema completo, a mesma potência ativa P_1 e uma potência reativa

(17) $$Q_2 = P_1\,.\,tg\varphi_2$$

A diferença entre as duas potências reativas é a potência reativa absorvida pelos três capacitores de correção:

(18) $$Q_{corr} = Q_1 - Q_2$$

de modo que a cada capacitor corresponderá uma potência reativa

$$\left|Q_{cap}\right| = \left|Q_{corr}\right|/\,3$$

Considerando que corrente I_C e tensão V_C no capacitor estão defasadas de 90º,

(19) $$\left|Q_{cap}\right| = V_C\,I_C = \omega\,C V_C^2$$

onde $\omega = 2\pi f$ é a freqüência angular do sistema.

Das duas últimas relações decorre

$$C = \frac{1}{3}\frac{|Q_{corr}|}{\omega V_C^2} \tag{20}$$

Se os capacitores estiverem ligados em triângulo, V_C é igual à tensão de linha; se ligados em estrela, V_C será igual à tensão de fase, ou $V_\ell/\sqrt{3}$. Indicando por C_Δ a capacitância em triângulo e por C_Y a em estrela, resultam

$$C_\Delta = \frac{1}{3}\frac{|Q_{corr}|}{\omega V_\ell^2} \tag{21}$$

$$C_Y = \frac{|Q_{corr}|}{\omega V_\ell^2} \tag{22}$$

Considerando que, à vista de (16), (17) e (18)

$$Q_{corr} = P_1\left(tg\varphi_1 - tg\varphi_2\right),$$

as capacitâncias de correção podem também ser calculadas por

$$C_\Delta = \frac{1}{3}\frac{P_1\left(tg\varphi_1 - tg\varphi_2\right)}{\omega V_\ell^2} \tag{23}$$

e

$$C_Y = \frac{P_1\left(tg\varphi_1 - tg\varphi_2\right)}{\omega V_\ell^2} \tag{24}$$

Quando a correção se faz com capacitores em triângulo, a capacitância é três vezes menor que no caso da estrela. Em compensação, os capacitores em triângulo devem suportar uma tensão $\sqrt{3}$ vezes maior que em estrela.

Como as capacitâncias são inversamente proporcionais ao quadrado da tensão de linha convirá, se houver transformador, passar a correção de fator de potência para o lado da alta tensão, para diminuir o valor da capacitância necessária.

4 - Bibliografia

[1] – R.A. Witte Electronic Test Instruments, 2nd edição, Prentice-Hall, 2002

[2] - R.M. KERCHNER e G.F. CORCORAN, Alternating - Current Circuits. (Wiley, 4ª ed., 1960; trad. em português: Globo, 1962)

[3] - I.F. KINNARD, Medidas Elétricas y sus Applicaciones (Ed. Técnicas Marcombo, Barcelona, 1958)

[4] - "Medidas de Potência e Fator de Potência", Laboratório de Eletricidade II, PSI-2316, 2007

[5] - L.Q. ORSINI, D. CONSONNI, Curso de Circuitos Elétricos, Volume 2, 2ª Edição, Cap. 20 (Ed. Edgard Blucher, Ltda., 2004)

[6] - M.B. STOUT, Curso Básico de Medidas Elétricas, (Ed. da USP e Livros Técnicos e Científicos, 1975 trad. da edição americana de 1960)