

Laboratório de Máquinas Eléctricas

Sistemas Trifásicos — medida de potência

Manuel Vaz Guedes

Núcleo de Estudos de Máquinas Eléctricas

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

No estudo laboratorial das Máquinas Eléctricas torna-se necessário conhecer o valor da tensão aplicada e da intensidade de corrente eléctrica, e, também do valor da *potência eléctrica*, que é o valor da variação da energia eléctrica na unidade de tempo ($P = dW/dt$) e em determinado ponto do circuito, e traduz a variação da capacidade de produzir trabalho na unidade de tempo.

Quando o sistema de corrente eléctrica da máquina é sinusoidal e trifásico, há que considerar as diferentes componentes da potência em jogo no funcionamento da máquina, devido ao esfasamento entre a tensão e intensidade de corrente eléctrica:

potência activa — P {watt: W} — é a variação, na unidade de tempo, da energia que é integralmente transformada em trabalho útil;

potência reactiva — Q {volt-ampère reactivo: var} — é a variação, na unidade de tempo, da energia que estabelece e mantém o campo magnético das máquinas eléctricas, e

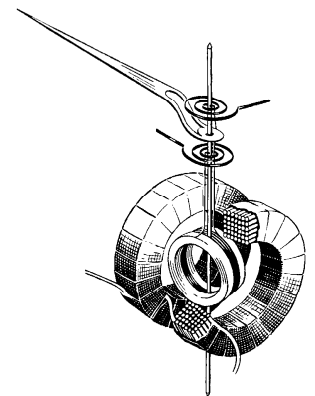
potência aparente — S {volt-ampère: VA} — traduz a máxima capacidade do sistema para realizar trabalho numa unidade de tempo; $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$.

A potência activa numa instalação trifásica é igual à soma da potência activa de cada uma das fases; $P = P_R + P_S + P_T$. Também a potência reactiva é a soma das potências reactivas de cada uma das fases; $Q = Q_R + Q_S + Q_T$.

O wattímetro

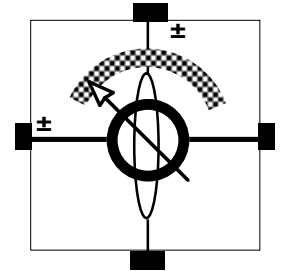
O wattímetro é, geralmente, um aparelho de medida monofásico, que nos sistemas trifásicos é utilizado em montagens próprias, que adiante serão apresentadas. Como numa instalação monofásica de grandezas sinusoidais a tensão e a intensidade de corrente eléctrica não estão sempre em fase, a potência eléctrica tem de ser medida com um aparelho com um princípio de funcionamento que considere o esfasamento φ entre aquelas grandezas eléctricas. Um aparelho do tipo *electrodinâmico* satisfaz essa exigência.

Os aparelhos electrodinâmicos baseiam-se na interacção entre as correntes eléctricas que atravessam duas bobinas uma fixa e outra móvel. A corrente eléctrica que atravessa a bobina fixa (bobina amperimétrica) tem uma intensidade de corrente proporcional à corrente eléctrica que circula nos condutores da montagem, enquanto que a corrente eléctrica que percorre a bobina móvel (bobina voltimétrica) é proporcional à tensão entre os dois condutores da montagem. Como o campo magnético criado pela bobina fixa é proporcional à intensidade de

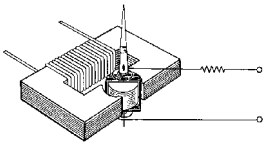


corrente eléctrica, e no interior desse campo magnético deslocam-se os condutores da bobina móvel percorridos por uma intensidade de corrente eléctrica proporcional ao valor da tensão, nesses condutores desenvolvem-se forças mecânicas que combinadas dão origem a um binário que é proporcional ao produto instantâneo das duas grandezas. Devido aos binários antagonistas, essencialmente a um binário de inércia, o aparelho dá indicação do valor médio dos impulsos de potência.

Na ligação de um wattímetro tem de se considerar a polaridade da corrente que atravessa cada uma das suas bobinas (porque influi na direcção do binário desenvolvido na equipagem móvel). Para indicar a forma de efectuar a ligação, um dos terminais de cada uma das bobinas (voltimétrica e amperimétrica) está marcado com um sinal ±.



± Os terminais marcados com um sinal ± devem ser ligados à mesma linha do circuito.



Quando se pretende obter um campo magnético indutor mais intenso utiliza--se um aparelho com um circuito magnético em material ferromagnético: “circuito magnético fechado”.

Atendendo ao princípio de funcionamento dos wattímetros, verifica-se que :

- ★ se apenas um dos circuitos (o amperimétrico ou o voltimétrico) estiver a ser utilizado, o ponteiro do aparelho não dá qualquer indicação (= 0); mas se a intensidade da corrente eléctrica que percorre a respectiva bobina (ou circuito) for superior ao valor máximo, o aparelho *“varia”*.

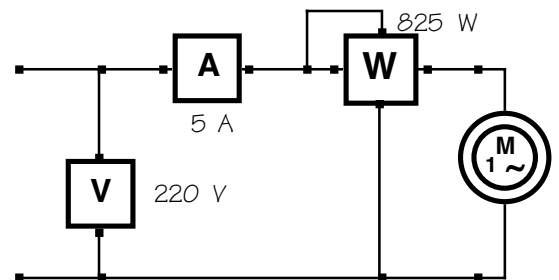
Para se aumentar a gama dos valores da potência que podem ser medidos com um wattímetro laboratorial existem diversos terminais de tensão e diversos terminais para diversos valores da intensidade de corrente eléctrica. Para aumentar a gama das tensões utilizam-se resistências eléctricas em série no circuito voltimétrico, enquanto que para aumentar a gama dos valores da intensidade de corrente eléctrica utilizam-se resistências em paralelo com a bobina amperimétrica, ou diferentes tamanhos da bobina amperimétrica.

No caso em que o wattímetro admite vários valores de tensão (120 V e 240 V) e vários valores de corrente (1 A, 5 A, 25 A), existe uma tabela que fornece o *factor multiplicativo* pelo qual se deve multiplicar o valor lido para se obter a verdadeira medida da potência.

□ Quando não existe essa tabela, mas a escala do wattímetro tem um número fixo de divisões (120), considera-se que no momento em que a potência activa é máxima o ponteiro indica a ultima divisão. Assim a escala de tensão é de $U = 120\text{ V}$, a escala de corrente é de $I = 50\text{ A}$, a máxima potência activa é de $P = 120 \times 50 \times \cos 0^\circ = 6\text{ kW}$; cada divisão vale $6000/120 = 50\text{ W}$.

A montagem de medida de potência eléctrica utilizada num circuito monofásico encontra-se representada na figura junta. Com esta montagem de medida, e considerando que as grandezas eléctricas têm uma variação sinusoidal no tempo, é possível determinar o valor do factor de potência da carga: $\lambda = P/S \equiv \cos \varphi$.

Exemplo_1 — Um motor eléctrico monofásico tem uma montagem de medida como a representada na figura. No voltímetro lê-se o valor da tensão alternada de alimentação, e indica o valor eficaz dessa tensão: 220 V. O amperímetro indica o valor eficaz da corrente eléctrica absorvida pelo motor: 5 A. O wattímetro indica o valor da potência activa absorvida pelo motor: 825 W.



A potência aparente do motor nesta situação de carga é: $S = U \cdot I$, ou $S = 220 \times 5 = 1100\text{ VA}$ (valor que nesta situação não tem um significado físico importante).

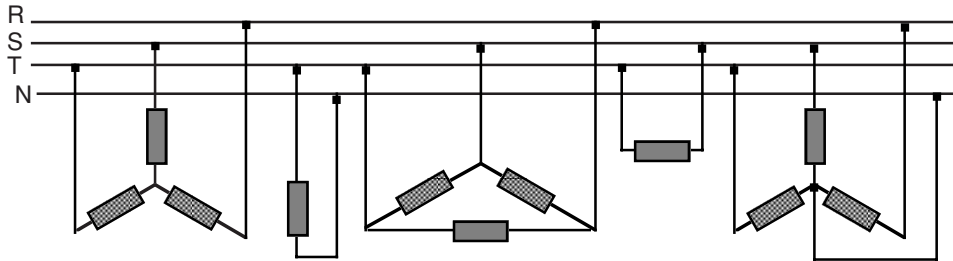
Com os valores conhecidos pode-se determinar o valor do factor de potência do motor. $\lambda = P/S = (U \cdot I \cdot \cos \varphi)/(U \cdot I)$, ou $\lambda \equiv \cos \varphi = 825/(220 \times 5) = 0,75$.

O valor da potência reactiva consumida pelo motor é: $Q = U \cdot I \cdot \text{sen}\varphi$, ou $Q = 220 \times 5 \times 0,661 = 727,58 \text{ var}$.

Verifica-se que $S^2 = P^2 + Q^2$, ou $S = \sqrt{825^2 + 727,58^2} = 1100 \text{ VA}$

Potência eléctrica num sistema trifásico

Num sistema de corrente alternada trifásico, as diferentes cargas monofásicas podem estar ligadas entre duas fases, ou entre fase e neutro. Uma carga trifásica, não activa, estará ligada em estrela ou estará ligada em triângulo às três fases do sistema de alimentação.

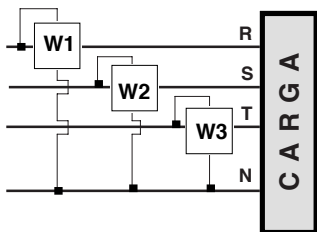
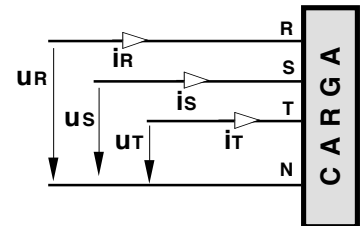


O neutro da estrela pode estar ligado ao neutro de um sistema de alimentação trifásico com quatro condutores.

A potência de uma carga trifásica é obtida a partir da potência de cada fase.

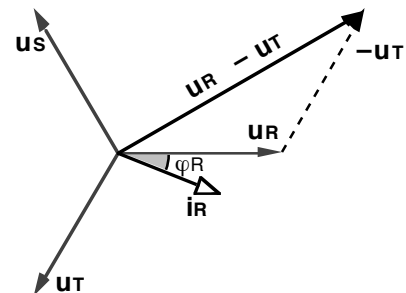
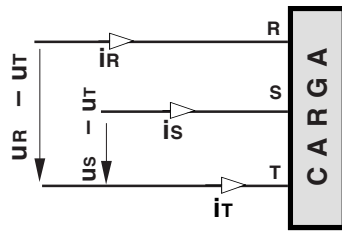
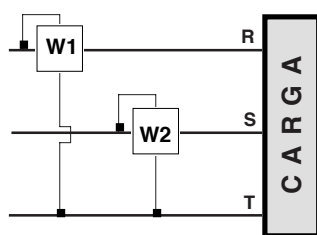
Regime de cargas desequilibradas

Num sistema trifásico com quatro fios (3 fases + neutro) o valor da potência instantânea é igual ao somatório do produto, para cada fase, do valor instantâneo da tensão simples pelo valor instantâneo da intensidade de corrente na linha: $p = u_R \cdot i_R + u_S \cdot i_S + u_T \cdot i_T$. A soma da medida de potência activa indicada por cada um dos wattímetros é o valor médio da potência eléctrica no ponto do circuito: $P = \{W1\} + \{W2\} + \{W3\}$.



A montagem de medida será efectuada intercalando-se cada uma das bobinas amperimétricas nas linhas de fase, enquanto que cada uma das bobinas voltimétricas será ligada entre a linha de fase e o neutro, sendo aplicada a cada bobina voltimétrica a tensão simples da fase.

Num sistema trifásico com três fios (3 fases) o valor da potência instantânea pode ser obtido atendendo a que, não existindo neutro, a soma das correntes instantâneas nas três fases é nula $i_R + i_S + i_T = 0$, ou $i_T = -(i_R + i_S)$. Substituindo este valor na equação da potência activa total instantânea, $p = u_R \cdot i_R + u_S \cdot i_S + u_T \cdot i_T$, resulta $p = u_R \cdot i_R + u_S \cdot i_S - u_T \cdot (i_R + i_S)$, ou $p = i_S \cdot (u_S - u_T) + i_R \cdot (u_R - u_T)$. Assim o valor da potência activa será dado pela soma da indicação de dois wattímetros, $P = \{W1\} + \{W2\}$. Cada um estará intercalado numa linha de fase e terá aplicada a tensão composta entre essa fase e a terceira fase onde não está intercalado qualquer wattímetro.



Atendendo ao diagrama fasorial para esta situação verifica-se que sendo o aparelho alimentado pela

tensão composta, está a efectuar a leitura da potência $P = U_{RT} \cdot I_R \cdot \cos(\text{ang}(U_{RT}, I_R))$, ou $P = U_{RT} \cdot I_R \cdot \cos(30^\circ + \text{ang}(U_R, I_R)) = U_{RT} \cdot I_R \cdot \cos(30^\circ + \varphi_R)$.

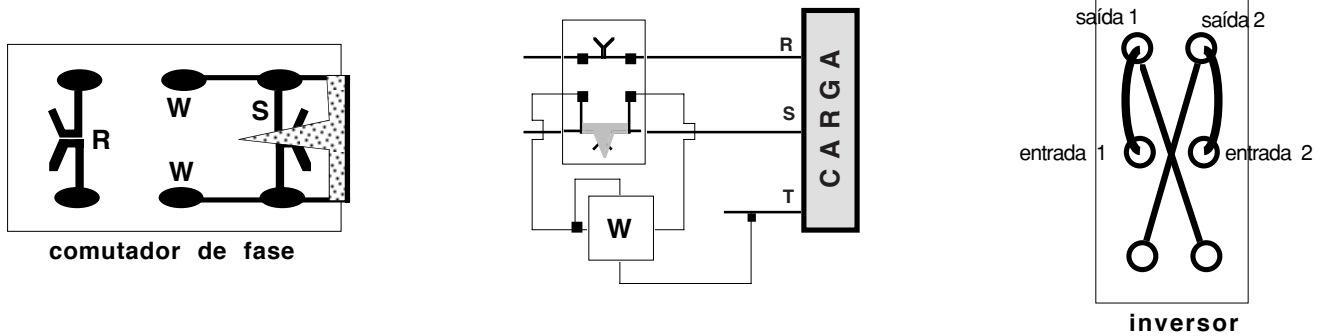
Se o factor de potência da fase R é igual a 0,5, isto é se $\varphi_R = 60^\circ$, e $(30^\circ + \varphi_R) = 90^\circ$, então a indicação do wattímetro é nula porque $P = U_{RT} \cdot I_R \cdot \cos(30^\circ + \varphi_R) = U_{RT} \cdot I_R \cdot \cos(30^\circ + 60^\circ) = 0$.

Se o factor de potência da fase R é inferior a 0,5, isto é se $\varphi_R > 60^\circ$ e $(30^\circ + \varphi_R) > 90^\circ$, então a indicação do wattímetro é negativa (o ponteiro tende a deslocar-se na escala para o outro lado do ponto zero: deslocação para a esquerda) porque $P = U_{RT} \cdot I_R \cdot \cos(30^\circ + \varphi_R)$, e $(30^\circ + \varphi_R) > 90^\circ$.

✂ nesta última situação a polaridade do circuito voltimétrico do wattímetro deve ser *trocada* (para o ponteiro se deslocar ao longo da escala), e o resultado da medida deverá entrar nas equações como um valor negativo: $P = \{-W1\} + \{W2\}$.

✂ se a deslocação dos ponteiros dos dois wattímetros se dá no sentido da escala negativa (deslocação para a esquerda), a montagem foi mal efectuada. Terá de ser refeita atendendo-se ao sinal \pm dos terminais.

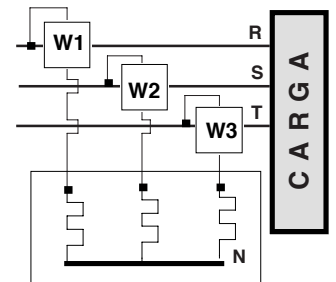
Na aplicação laboratorial do método dos dois wattímetros pode ser utilizado somente um wattímetro conjuntamente com um *comutador de fase*. O comutador de fase é um aparelho simples que permite intercalar a bobina amperimétrica do wattímetro numa fase ou noutra. A potência total continua a ser a soma algébrica das duas leituras.



Na montagem de medida da potência activa com um só wattímetro para um sistema trifásico, que possui apenas os fios de fase acessíveis, é aconselhável a utilização no circuito voltimétrico de um *inversor*, que permita alterar a polaridade da ligação da bobina voltimétrica.

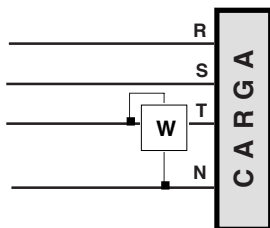
Com esta montagem de medida (método dos dois wattímetros) não é possível conhecer a potência por fase: apenas é possível conhecer a potência total absorvida pelo sistema.

Quando numa instalação trifásica com três fios (3 fases) é necessário conhecer a potência por fase pode-se utilizar uma montagem de medida com três wattímetros, mas criando um ponto neutro — *neutro artificial* — com o auxílio de uma caixa de três resistências.



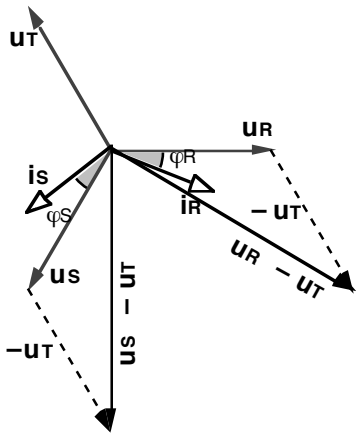
Regime de cargas equilibradas

Na situação de regime de cargas equilibradas a intensidade da corrente eléctrica nas três fases é a mesma $i_R = i_S = i_T = i$, assim com são os mesmos os ângulos de esfasamento das três fases $\varphi_R = \varphi_S = \varphi_T = \varphi$.



Num sistema trifásico com quatro fios (3 fases + neutro) o valor da potência activa pode ser obtido com a utilização de uma montagem de medida com um só wattímetro; o que se passa numa fase repete-se nas outras duas, e, por isso, o valor da potência activa é o triplo do valor lido no wattímetro $P = 3 \cdot \{W\}$.

Num sistema trifásico com três fios (3 fases) pode ser utilizado o método dos dois wattímetros, que, nesta situação de regime de cargas equilibradas, além de permitir determinar o valor da potência activa permite também determinar o valor da potência reactiva.



Como na situação de cargas desequilibradas, a montagem com os dois wattímetros permite determinar o valor da potência activa

$$P = U_{RT} \cdot I_R \cdot \cos(30^\circ - \varphi_R) + U_{ST} \cdot I_S \cdot \cos(30^\circ + \varphi_S)$$

$$P = U_C \cdot I \cdot (\cos(30^\circ - \varphi) + \cos(30^\circ + \varphi)) = U_C \cdot I \cdot (\sqrt{3} \cdot \cos \varphi) = \sqrt{3} \cdot U_C \cdot I \cdot \cos \varphi$$

ou $P = \{W1\} + \{W2\}$

Efectuando a diferença das duas leituras, pode-se determinar o valor da potência reactiva dividido por $\sqrt{3}$.

$$U_{RT} \cdot I_R \cdot \cos(30^\circ - \varphi_R) - U_{ST} \cdot I_S \cdot \cos(30^\circ + \varphi_S) = Q/\sqrt{3}$$

$$Q/\sqrt{3} \cdot = U_C \cdot I \cdot (\cos(30^\circ - \varphi) - \cos(30^\circ + \varphi)) = U_C \cdot I \cdot (\text{sen } \varphi) = U_C \cdot I \cdot \text{sen } \varphi$$

ou $Q = \sqrt{3} \cdot (\{W1\} - \{W2\})$

(NB) Note-se, atendendo à respectiva dedução, que a determinação da *potência reactiva* Q com o método dos dois wattímetros só é possível quando o regime de cargas é equilibrado.

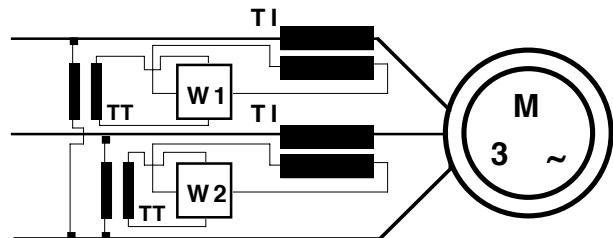
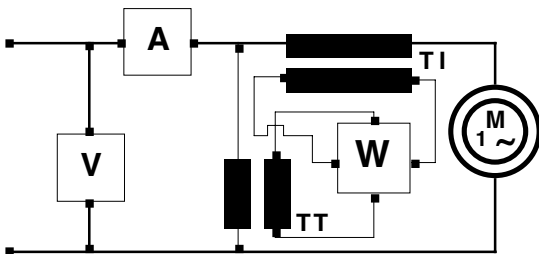
Conhecido o valor da potência activa e da potência reactiva é possível determinar o factor de potência da instalação, que na situação de grandezas sinusoidais e de regime de cargas equilibradas é dado por: $\lambda \equiv \cos \varphi$.

$$\text{tg } \varphi = Q/P = \sqrt{3} \cdot (\{W1\} - \{W2\}) / (\{W1\} + \{W2\}), \text{ e atendendo a que } \cos^2 \varphi = 1 / (1 + \text{tg}^2 \varphi).$$

Se na expressão para $\text{tg} \varphi$ se dividir o numerador e o denominador pela leitura do wattímetro 1 $\{W1\}$, surge uma razão $r = \{W2\} / \{W1\}$, e demonstra-se que: $\cos \varphi = (1 + r) / (2 \cdot \sqrt{r^2 - r + 1})$.

Utilização de transformadores de medida

Quando os limites da intensidade de corrente ou da tensão do wattímetro são inferiores aos valores dessas grandezas no circuito provoca-se o aumento da escala do wattímetro com o auxílio de transformadores de medida: *transformadores de intensidade* TI e *transformadores de tensão* TT.



Exemplo_2 — Na medida de potência activa de um circuito monofásico foram utilizados transformadores de medida de intensidade e de tensão. A indicação do wattímetro foi de 80 unidades, quando o máximo da escala de tensão era de 120 V, e o máximo da escala de intensidade de corrente era de 5 A, e o número total de divisões da escala é 120. O circuito amperimétrico era alimentado por um transformador de intensidade com razão 50/5 A, e o circuito voltimétrico estava alimentado por um transformador de tensão com uma razão 6600/110 V. A potência activa medida tem o valor: $P = 80 \times (600/120) \times (50/5) \times (6600/110) = 240 \text{ kW}$.

- MVG.94 -

Bibliografia

Carlos Araújo Sá; “Transformadores de Medida”, Caderno de Estudos de MÁQUINAS ELÉCTRICAS nº 4, pp. 14-29, 1992

E. W. Golding, F.C. Widdis; “Electrical Measurements and Measuring Instruments”, Pitman, 1963

Manuel Vaz Guedes; “Corrente Alternada — sistemas polifásicos”, NEME, 1991, 1993