Universidade Estadual de Campinas
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO
DT-FEEC-UNICAMP

EA513 I - Circuitos Elétricos I

Cap. VIII - Potência em Regime Permanente

Neste Capítulo serão vistos, dentro do contexto de circuitos elétricos excitados com sinais periódicos e em regime permanente, conceitos sobre potência média consumida e fornecida, valor eficaz de tensões e correntes, fator de potência e potência complexa.

1 Potência média

Foi visto que :

$$p(t) = \text{potência no instante } t = v(t)i(t)$$

Se $v(t)$ e $i(t)$ forem periódicos com período T:

$$\begin{aligned} v(t+T) &= v(t) \\ i(t+T) &= i(t) \\ p(t+T) &= v(t+T)i(t+T) \\ \Rightarrow & \\ p(t+T) &= p(t) \end{aligned}$$

Ou seja, $p(t)$ também é periódica.

Define-se **potência média** como sendo:

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

Antes de prosseguir, seja a Tabela 1 a seguir:

$f(t)$	$\int_o^{2\pi/w} f(t)dt$
$sin(nwt+\alpha); cos(mwt+\beta)$	0
$sin^2(nwt+\alpha); cos^2(mwt+\beta)$	$\frac{\pi}{w}$
$sin(nwt+\alpha).cos(mwt+\beta)$	0
$cos(nwt+\alpha).cos(mwt+\beta)$	$\frac{\pi}{w}cos(\alpha-\beta)$ se $m=n$
	0 se $m \neq n$

Tabela 1

Considere a Figure 1:

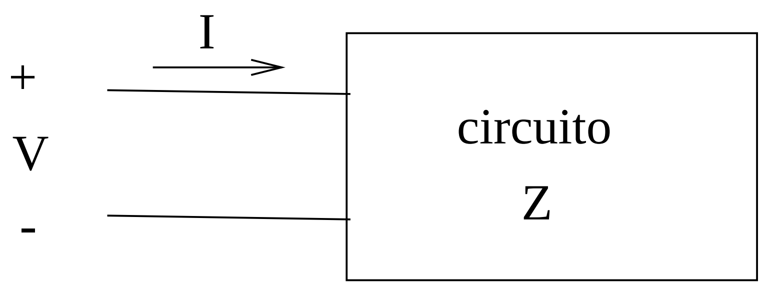

Figure 1: Circuito elétrico na forma fasorial

$$\begin{cases} Z &= |Z|\angle(\theta) \\ V &= V_m\angle(\phi) \end{cases}$$

$$\Rightarrow I = \frac{V}{Z} = \frac{V_m}{|Z|}\angle(\phi-\theta)$$

Portanto:

$i(t) = I_m cos(wt + \phi - \theta)$ onde $I_m = \frac{V_m}{|Z|}$

Consequentemente, lembrando que:

$$P = \frac{1}{T}\int_o^T v(t)itdt \qquad (2)$$

$$\begin{aligned} P &= \tfrac{w}{2\pi}\int_o^{2\pi/w} V_m I_m cos(wt+\phi)cos(wt+\phi-\theta)dt \\ P &= V_m I_m \tfrac{w}{2\pi}\tfrac{\pi}{w}cos(\phi-(\phi-\theta)) \end{aligned}$$

$$P = \frac{V_m I_m}{2} cos\theta \qquad (3)$$

onde θ é a fase da impedância Z.

Exemplos:

1. Resistor
   $V_m = RI_m$ com $\theta = 0^o$

$P_R = \frac{V_m I_m}{2} cos(0^o) = \frac{1}{2} R I_m^2$

2. Indutor
   $Z_L = wL\angle(90^o)$
   $P_L = \frac{V_m I_m}{2} cos(90^o) = 0$

3. Capacitor
   $Z_C = \frac{1}{wC}\angle(-90^o)$
   $P_C = \frac{V_m I_m}{2} cos(-90^o) = 0$

4. Corrente contínua I_{cc}

$$P_{cc} = \frac{1}{T} \int_o^T R I_{cc}^2 dt = R I_{cc}^2 \frac{1}{T} \int_o^T dt \qquad (4)$$

   $\Rightarrow P_{cc} = R I_{cc}^2$

5. Impedância $Z = |Z|\angle(\theta)$
   $Z = Re[Z] + j Imag[Z] = |Z|\angle(\theta)$

$$cos\theta = \frac{Re[Z]}{|Z|} \text{ e } V_m = |Z|I_m$$
$$P_Z = \frac{1}{2}V_m I_m cos(\theta) = \frac{1}{2}(I_m|Z|)(I_m)\frac{Re[Z]}{|Z|}$$
$$P_Z = \frac{1}{2}I_m^2 Re[Z]$$

Observações:

- R dissipa potência
- L e C puros não dissipam energia
- $Z = |Z|\angle(\theta)$ tem caráter:
  resistivo se $\theta = 0$
  capacitivo se $-\frac{\pi}{2} \leq \theta \leq 0$
  indutivo se $0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}$

Exemplo:

O circuito da Figure 2 está em regime permanente. Determine as potências médias nos bipolos.

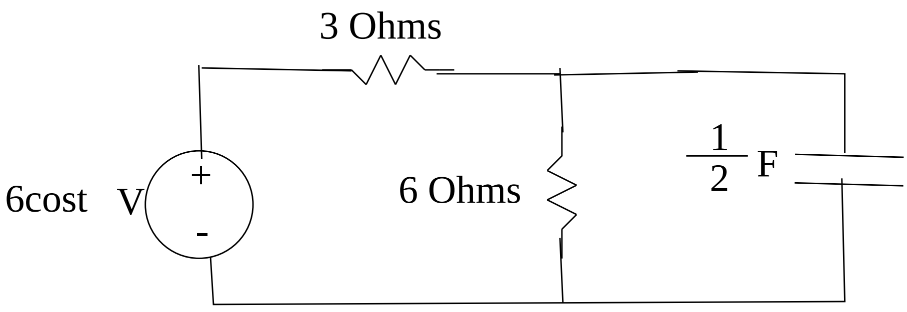

Figure 2: Potências médias nos bipolos

Solução:

A representação correspondente, na forma de fasores, está mostrada na Figure 3.

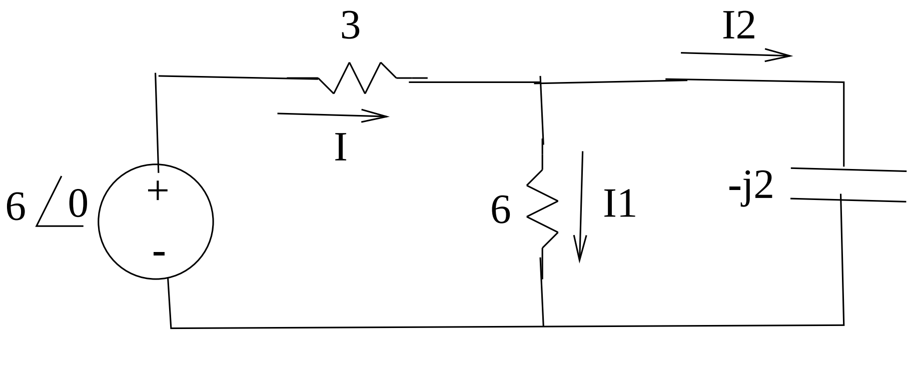

Figure 3: Potências médias nos bipolos

$$Z_{eq} = 3 + (6 \text{ em paralelo com } (-j2))$$

$$Z_{eq} = 3 + \frac{6(-j2)}{6-j2} = 9\frac{1-j}{3-j}$$

$$Z_{eq} = 9\frac{\sqrt{2}\angle(-45^o)}{\sqrt{10}\angle(-18.435^o)} = \frac{9}{\sqrt{5}}\angle(-26.56^o)$$

$$I = \frac{6\angle(0^o)}{9\sqrt{5}}\angle(-26.56^o) = \frac{2\sqrt{5}}{3}\angle(26.56^o)$$

Lembrando que $V_m = 6$ e $I_m = \frac{2\sqrt{5}}{3}$:

$$P = \frac{1}{2}V_m I_m cos\theta = \frac{1}{2}6.\frac{2\sqrt{5}}{3}cos(26.56^o)$$

$$P = 3.\frac{2\sqrt{5}}{3}\frac{2}{\sqrt{5}}$$

$$\Rightarrow P = 4 \text{ W}$$

que é a potência total entregue pela fonte ao resto do circuito. Na convenção de receptor, portanto, na fonte tem-se:

$$P_{fonte} = -4 \text{ W}$$

Como o capacitor não consome energia:

$$P_C = 0 \text{ W}$$

No resistor de 3Ω:

$$P_{3\Omega} = \frac{1}{2}RI_m^2 = \frac{1}{2}3(\frac{2\sqrt{5}}{3})^2 \text{ W}$$

$$P_{3\Omega} = \frac{10}{3} \text{ W}$$

No resistor de 6Ω:

$$I2 = \frac{-j2}{6-j2}I = \frac{-j}{3-j}\frac{2\sqrt{5}}{3}\angle(26.56^o)$$

$$I2 = \frac{1\angle(-90^o)}{\sqrt{10}\angle(-18.435^o)}\frac{2\sqrt{5}}{3}\angle(26.56^o)$$

$$I2 = \frac{\sqrt{2}}{3}\angle(-45^o)$$

Logo:

$P_{6\Omega} = \frac{1}{2}6(\frac{\sqrt{2}}{3})^2 = \frac{2}{3}$ W

Note que:

$P_{3\Omega} + P_{6\Omega} = \frac{10}{3} + \frac{2}{3} = 4 = -P_{fonte}$ W

Superposição em Potência

Foi visto que potência num resistor R é dado por:

$p(t) = v(t)i(t) = Ri^2(t)$

Quando $i(t)$ for obtido utilizando o princípio de superposição (circuitos com 2 ou mais fontes), tem-se:

$i(t) = i_1(t) + i_2(t)$

Consequentemente:

$$p(t) = R(i_1(t) + i_2(t))^2$$

$$p(t) = Ri_1^2(t) + RI_2^2(t) + 2Ri_1(t)i_2(t)$$

Ou seja, em algumas situações **não** se aplica superposição de potências.

Em sinais periódicas, a potência média fica:

$$P = \frac{1}{T}\int_o^T (Ri_1^2(t) + RI_2^2(t) + 2Ri_1(t)i_2(t))dt \tag{5}$$

$$P = P_1 + P_2 + \frac{2R}{T}\int_o^T i_1 i_2 dt \tag{6}$$

Quando as fontes têm frequências diferentes, a integral do produto $i_1 i_2$ num período é nula

(ver a Tabela 1 no item 1 deste Capítulo)

Portanto, neste caso se aplica superposição mas não se aplica quando as fontes têm frequências iguais.

Exemplo: Seja o circuito da Figure 4, com $R = 100\Omega$. Pede-se P_R nos seguintes casos:

1. $v1 = 100cos(377t+60^o)$ e $v2 = 50cos(377t)$
2. $v1 = 100cos(377t + 60^o)$ e $v2 = 50$

Solução:

1) Frequências iguais, portanto não se aplica superposição nas potências mas pode-se aplicar nas correntes.

$V1 = 100\angle(60^o)$ e $V2 = 50\angle(0^o)$

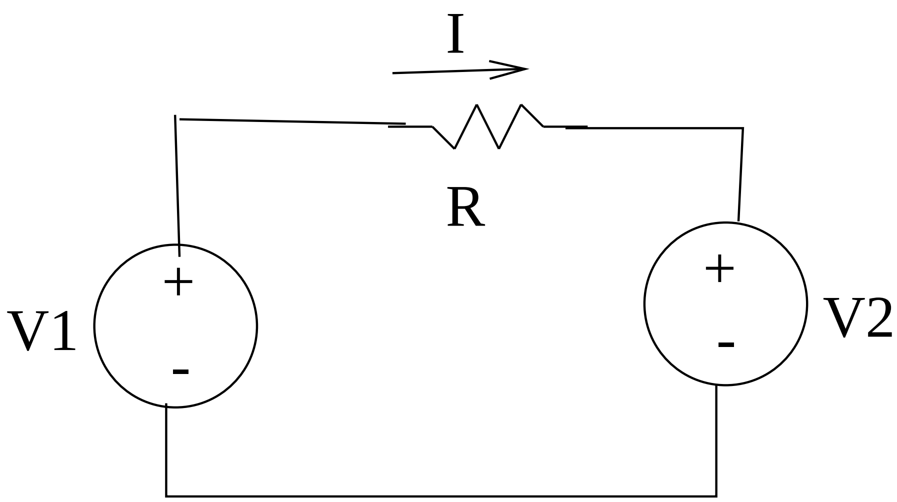

Figure 4: Superposição em potências

$$I1 = \frac{V1}{R} = \frac{100\angle(60^o)}{100} = 1\angle(60^o)$$

$$I2 = -\frac{V2}{R} = -\frac{50\angle(0^o)}{100} = -0.5\angle(0^o)$$

$$I = I1 + I2 = 1\angle(60^o) - 0.5 = 1e^{j60^o} - 0.5$$

$$I = (cos(60^o) + jsin(60^o)) - 0.5$$

$$I = 0.5 + j\frac{\sqrt{3}}{2} - 0.5$$

$$I = j\frac{\sqrt{3}}{2} = \frac{\sqrt{3}}{2}\angle(90^o)$$

$P_m = \frac{1}{2} I_m^2 Re[Z] = \frac{1}{2} (\frac{\sqrt{3}}{2})^2 100$

$P_m = \frac{300}{8} = 37.5$ W

Por superposição de potências, tem-se:

$P_m = \frac{1}{2} 1^2 100 + \frac{1}{2} 0.5^2 100 = 62.5$ W, o que está incorreto.

2) Frequências diferentes, portanto pode-se aplicar superposição nas potências como também nas correntes.

$V1 = 100\angle(60^o)$ e $V2 = 50cc$

$P_{m1} = \frac{1}{2} 100(1^2) = 50$ W

$P_{m2} = 100(0.5)^2 = 25$ W

Portanto:

$$P_m = P_{m1} + P_{m2} = 50 + 25 = 75 \text{ W}$$

2 Valor eficaz

Considere o circuito da Figure 5:

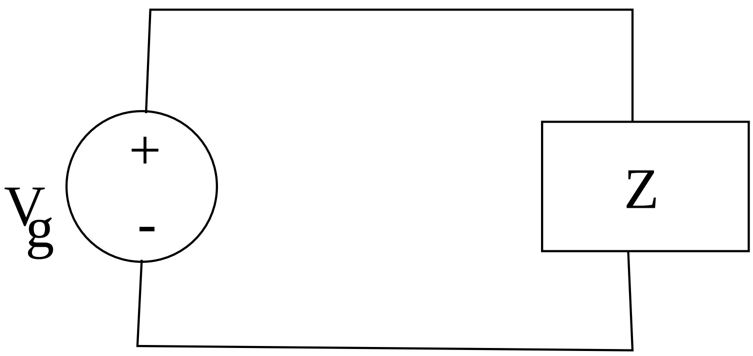

Figure 5: Potência entregue pela fonte à impedância

A potência média entregue pela fonte V_g à impedância Z depende da forma de onda de V_g. Para comparar valores de potência entregue por diferentes fontes V_g (frequência e forma de onda diferentes), define-se **valor eficaz** ou **rms** (root mean square):

O valor eficaz V_{ef} ou I_{ef} de uma tensão ou corrente periódica é o valor de tensão ou corrente que entrega a mesma potência média para uma resistência R.

Ou seja:

$$P_m = RI_{ef} = \frac{1}{T}\int_o^T Ri^2(t)dt \qquad (7)$$

$$I_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_o^T i^2(t)dt} \qquad (8)$$

Lembrando que $I_{ef} = \frac{V_{ef}}{R},\ i(t) = \frac{v(t)}{R}$:

$$V_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_o^T v^2(t)dt} \qquad (9)$$

Quando:

$$\begin{cases} i(t) & = I_m cos(wt + \phi) \\ v(t) & = V_m cos(wt + \theta) \end{cases}$$

$$I_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_o^T I_m^2 cos^2(wt + \phi) dt} \tag{10}$$

$$I_{ef} = \sqrt{\frac{w}{2\pi} I_m^2 \int_o^{\frac{2\pi}{w}} cos^2(wt + \phi) dt} \tag{11}$$

$$I_{ef} = \sqrt{\frac{w}{2\pi} I_m^2 \frac{\pi}{w}} \tag{12}$$

$\Rightarrow I_{ef} = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$

Analogamente:

$\Rightarrow V_{ef} = \frac{V_m}{\sqrt{2}}$

Portanto, pode-se escrever:

$$P_m = V_{ef} I_{ef} cos\theta = I_{ef}^2 Re[Z]$$

Exemplos: Determinar valor eficaz dos seguintes sinais:

1. $i(t) = I, 0 \leq t < 2$
   $i(t) = -I, 2 \leq t \leq 4$

$$I_{ef}^2 = \frac{1}{4}[\int_o^2 I^2 dt + \int_2^4 (-I)^2 dt] \qquad (13)$$

$$I_{ef}^2 = \frac{I^2}{4}[(2-0)+(4-2)] = I^2$$

$$\Rightarrow I_{ef} = I$$

2. $i(t) = 10sin(wt) + 20cos(wt + 30^o)$

$$I_{ef}^2 = \frac{w}{2\pi}[\int_o^{2\pi/w}(10^2 sin^2(wt) + 20^2 cos^2(wt + 30^o) + 2.10.20 sinwtcos(wt + 30^o))dt]$$

$$I_{ef}^2 = \frac{w}{2\pi}[100\frac{\pi}{w} + 400\frac{\pi}{w} + 400\int_o^{2\pi/w} cos(wt - 90^o)cos(wt + 30^o)dt]$$

$$I_{ef}^2 = 50 + 200 + \frac{400w}{2\pi}\frac{\pi cos(-90^o - 30^o)}{w}$$

$$I_{ef} = \sqrt{150}$$

3. $i(t) = I_m(1 + cos377t)$

$$I_{ef}^2 = I_m^2 + \frac{377}{2\pi} I_m^2 \int_o^{2\pi/377} cos^2 377tdt$$

$$I_{ef}^2 = I_m^2 + \frac{377 I_m^2}{2\pi}\frac{\pi}{377} = \frac{3I_m^2}{2}$$

$$I_{ef} = I_m\sqrt{\frac{3}{2}}$$

3 Fator de potência

Foi visto que $P_m = V_{ef} I_{ef} cos\theta$

- Conforme já visto, P_m é chamado de potência **média** (em W ou KW)
- $P_{ap} = V_{ef} I_{ef}$ recebe o nome de potência **aparente** (em VA ou KVA)
- $fp = cos\theta$ é chamado de **fator de potência**
- θ é chamado de ângulo de fp
- Portanto $P_m = P_{ap} fp$

Observações:

1. $fp = \frac{P_m}{P_{ap}} = cos\theta$

2. $0 \leq fp \leq 1$

3. se $-\frac{\pi}{2} \leq \theta \leq 0$, tem-se circuito capacitivo e diz-se que tem fp adiantado (corrente em relação à tensão)
4. se $0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}$, tem-se circuito indutivo e diz-se que tem fp atrasado

Exemplo: Considere o circuito da Figure 6. Determine a potência aparente P_{ap} entregue pela fonte ao circuito e I_{ef} se:

a) $fp = 0.85$

b) $fp = 0.95$

Solução:

a) Como $P_m = V_{ef}I_{ef}cos\theta$, com $P_m = 100$ KW, $V_{ef} = 220$ V e $fp = 0.85$:

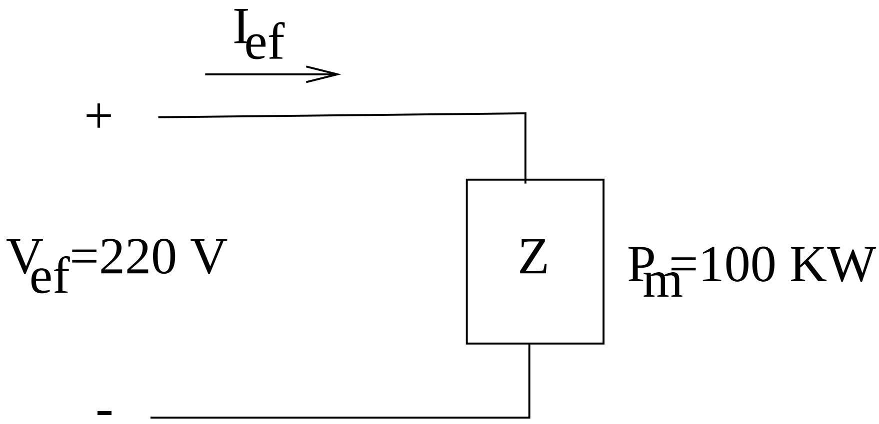

Figure 6: Potência aparente entregue pela fonte à impedância

$$P_{ap} = \frac{P_m}{fp} = \frac{100KW}{0.85} \cong 117.65 \text{ KVA}$$

$$I_{ef} = \frac{100KW}{(220)(0.85)} \cong 534.8 \text{ A}$$

A fonte entrega 117.65 KVA ao circuito, dos quais 100 KW é consumido.

b) $fp = 0.95$

$$P_{ap} = \frac{100KW}{0.95} = 105.26 \text{ KVA}$$

$I_{ef} = \frac{100KW}{(220)(0.95)} \cong 478.5$ A

A fonte entrega 105.26 KVA ao circuito, dos quais 100 KW é consumido.

Pelos resultados, percebe-se que no caso b), a fonte (ou a usina) precisa entregar menos energia ao circuito que no caso a). Portanto, quanto mais perto de 1 for o fp, melhor o aproveitamento da energia fornecida.

Este fato traz a idéia de modificar o fp através de introdução de um dispositivo no circuito, como mostrado a seguir.

Compensação de fp

Para alcançar este objetivo, introduz-se um dispositivo tal que os seguintes critérios devem ser observados:

- Não deve interferir no circuito original, ou seja, não pode mudar a potência média entregue ao circuito (ou à carga).
- Não deve dissipar energia adicional.

- Para atender ao primeiro item, o dispositivo deve ser colocado em paralelo com o circuito.

- Para atender ao segundo item, o novo dispositivo deve ser puramente reativo.

Assim, a configuração da Figure 7 é a recomendada.

com $Z1 = jX1$.

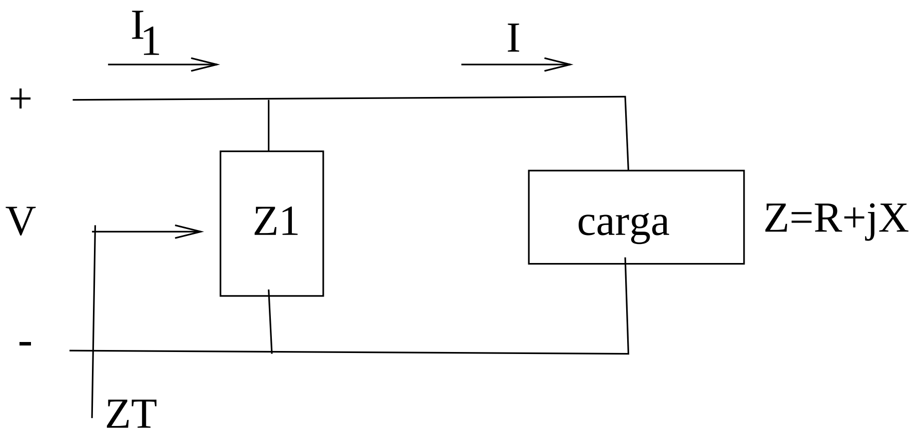

Figure 7: Compensação de fator de potência

$$ZT = \frac{Z.Z1}{Z+Z1} = Re[ZT] + jImag[ZT]$$

Seja $fp_n = cos\theta_n$ o novo fator de potência desejada.

$$\Rightarrow tg(\theta_n) = tg(cos^{-1} fp_n) = \frac{Imag[ZT]}{Re[ZT]}$$

Mas:

$$ZT = \frac{jX1(R+jX)}{jX1+R+jX}$$

$$ZT = \frac{RX1^2 + jX1(R^2+X^2+XX1)}{R^2+(X+X1)^2}$$

Portanto:

$$tg\theta_n = \frac{X1(R^2+X^2+XX1)}{RX1^2}$$

$$tg\theta_n = \frac{R^2+X^2+XX1}{RX1}$$

$$RX1tg[cos^{-1}fp_n] = R^2 + X^2 + XX1$$

$$\Rightarrow X1 = \frac{R^2+X^2}{Rtg[cos^{-1}fp_n]-X}$$

Exemplo: Considere o circuito da Figure 8, $w = 100$ rad/seg.

1. Qual o fp visto pela fonte?
2. Determine o componente a ser colocado em paralelo à carga do circuito para obter $fp = 0.95$ atrasado.

3. Determine o componente a ser colocado em paralelo à carga do circuito para obter $fp = 0.95$ adiantado.

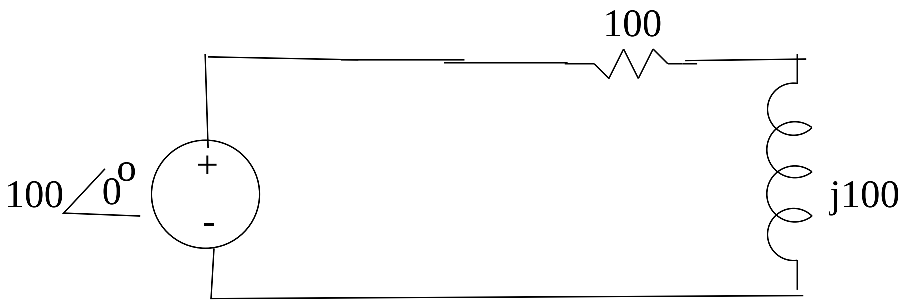

Figure 8: Exemplo de compensação de fator de potência

Solução:

1. Da Figure 8, tem-se:
   $Z = 100 + j100 = R + jX = 100\sqrt{2}\angle(45^o)$
   Portanto:

   $$fp = cos45^o = \frac{\sqrt{2}}{2} = 0.707 \text{ atrasado.}$$

2. Como $fp_n = 0.95$ atrasado, $\theta_n = 18.2^o$
   Utilizando a expressão deduzida:

$X1 = \frac{R^2+X^2}{Rtg[cos^{-1}fp_n]-X}$

$X1 = \frac{100^2+100^2}{100tg[18.2^o]-100}$

$X1 = \frac{200}{0.328-1} = -297.92$

$X1$ é um capacitor
Como $|X1| = \frac{1}{wC}$

$C = \frac{1}{100(297.92)} = 33.56\ 10^{-6}$ F

Ou seja: $C = 33.56\mu$F

3. Como $fp_n = 0.95$ adiantado, $\theta_n = -18.2^o$

$X1 = \frac{100^2+100^2}{100tg[-18.2^o]-100}$

$X1 = \frac{200}{-0.328-1} \cong -150.525$

$X1$ é um capacitor
$C = \frac{1}{100(150.525)} = 66.41\ 10^{-6}$ F

Ou seja: $C = 66.41 \mu$F

4 Potência complexa

Dados:

$Z = |Z| \angle(\theta)$, $V = V_m \angle(\phi)$

$\Rightarrow I = \frac{V_m \angle(\phi)}{|Z| \angle(\theta)} = I_m \angle(\phi - \theta)$

Alternativamente:

$$
\begin{aligned}
V &= V_m e^{j\phi} \\
I &= I_m e^{j(\phi-\theta)}
\end{aligned}
$$

Definiu-se valores eficazes:

$$
\begin{aligned}
V_{ef} &= \frac{V_m}{\sqrt{2}} \\
I_{ef} &= \frac{I_m}{\sqrt{2}}
\end{aligned}
$$

Pode-se definir **fasores eficazes**:

$$
\begin{aligned}
\mathbf{V}_{ef} &= \frac{V}{\sqrt{2}} = V_{ef} e^{j\phi} \\
\mathbf{I}_{ef} &= \frac{I}{\sqrt{2}} = I_{ef} e^{j(\phi-\theta)}
\end{aligned}
$$

Como: $P_m = V_{ef} I_{ef} cos\theta = Re[V_{ef} I_{ef} e^{j\theta}]$

Tem-se:

$P_m = Re[\mathbf{V}_{ef}\mathbf{I}^*_{ef}]$

$\mathbf{I}_{ef}^*$ representa complexo conjugado de $\mathbf{I}_{ef}$

Note que:

$\mathbf{V}_{ef}\mathbf{I}_{ef}^* = V_{ef}I_{ef}e^{j\theta}$

$\mathbf{V}_{ef}\mathbf{I}_{ef}^* = V_{ef}I_{ef}cos\theta + jV_{ef}I_{ef}sin\theta$

Define-se **potência complexa**:

$S =$ Potência Complexa $= \mathbf{V}_{ef}\mathbf{I}_{ef}^*$

$S = P_m + jQ$

onde:

$$\begin{aligned} P_m &= V_{ef}I_{ef}cos\theta \\ Q &= V_{ef}I_{ef}sin\theta \end{aligned}$$

- $P_m =$ potência média (W)

- Q = potência reativa (VAR - volt-ampére reativo)

Observações:

- $|S| = |\mathbf{V}_{ef}\mathbf{I}^*_{ef}| = |V_{ef}I_{ef}e^{j\theta}| = V_{ef}I_{ef}$
- $Q = Imag[S] = V_{ef}I_{ef}sin\theta$
- $tg\theta = \frac{Q}{P_m}$

Compensação de fator de potência utilizando potência complexa

Seja a configuração da Figure 9.

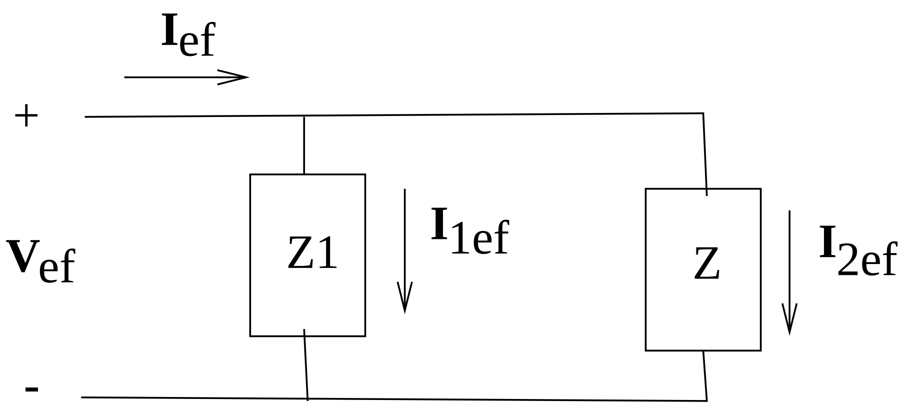

Figure 9: Compensação de fator de potência via potência complexa

Tem-se:

$$S = \mathbf{V}_{ef}\mathbf{I}_{ef}^{*} = \mathbf{V}_{ef}(\mathbf{I}_{1ef} + \mathbf{I}_{2ef})^{*}$$

Logo:

$$S = \mathbf{V}_{ef}\mathbf{I}_{1ef}^{*} + \mathbf{V}_{ef}\mathbf{I}_{2ef}^{*} = S_1 + S_2$$

Mas:

$$S_2 = \mathbf{V}_{ef}\mathbf{I}^*_{2ef} = P_m + jQ$$

$$S_1 = \mathbf{V}_{ef}\mathbf{I}^*_{1ef}$$

$$S_1 = \frac{V}{\sqrt{2}}[\frac{V}{\sqrt{2}}\frac{1}{jX1}]^*$$

$$S_1 = \frac{V_m\angle(\theta)}{\sqrt{2}}[\frac{V_m\angle(-\theta)}{\sqrt{2}}\frac{1}{X1\angle(-90^O}))]$$

$$S_1 = \frac{V_m^2}{2X1}\angle(90^o) = jQ1$$

com $Q1 = \frac{V_m^2}{2X1}$

Consequentemente:

$$S = S_1 + S_2 = P_m + j(Q + Q1)$$

$$\Rightarrow \theta_n = arctg(\frac{Q+Q1}{P_m})$$

Assim:

$$\begin{cases} P_m & = potencia\ media\ (constante) \\ Q + Q1 & = potencia\ reativa\ (nova) \end{cases}$$

Exemplo: Considere o exemplo da Figure 8 ($w = 100\ rad/seg$). Resolver utilizando compensação de potência via potência complexa.

Solução:

1. Já resolvido: $fp_{antes} = 0.707$.
2. Novo $fp = 0.95$ atrasado.

$$S_{antes} = \mathbf{V}_{ef}\mathbf{I}^*_{ef} = \frac{V}{\sqrt{2}}(\frac{I}{\sqrt{2}}$$

$$S_{antes} = \frac{100\angle(0^o)}{\sqrt{2}}(\frac{100\angle(0^o)}{\sqrt{2}(100+j100)})^*$$

$$S_{antes} = \frac{50}{\sqrt{2}}\angle(45^o) = 25 + j25$$

$$\begin{cases} P &= 25\ W \\ Q &= 25\ VAR \end{cases}$$

$$S_{depois} = P_m + j(Q + Q1) = 25 + j(25 + Q1)$$

$$fp_n = 0.95 \text{ atrasado} = cos\theta_n$$

$$\Rightarrow \theta_n = 18.2^o$$

Mas: $\theta_n = arctg(\frac{25+Q1}{25})$

$$tg18.2^o = 0.3288 = \frac{25+Q1}{25}$$

$$\Rightarrow Q1 = -16.78$$

Foi visto que: $Q1 = \frac{V_m^2}{2X1}$

Portanto: $Q1 = -16.78 = \frac{100^2}{2X1}$

$\Rightarrow X1 = -297.9$ (capacitivo)

$|X1| = \frac{1}{wC} = 297.9$

$\Rightarrow C1 \cong 33.56\ \mu\text{F}$

3. Novo $fp = 0.95$ adiantado.

$fp_n = 0.95 \text{ adiantado} = cos\theta_n$

$\Rightarrow \theta_n = -18.2^o$

$tg(-18.2^o) \cong -0.3288 = \frac{25+Q1}{25}$

$\Rightarrow Q1 \cong -8.3788$

Portanto: $Q1 = -8.3788 = \frac{100^2}{2X1}$

$\Rightarrow X1 \cong -150.51$ (capacitivo)

$|X1| = \frac{1}{wC} = 150.51$

$\Rightarrow C1 \cong 66.41\ \mu\text{F}$

A. Y.
DSE-FEEC-UNICAMP
1s/2020