Instituto Superior de Engenharia do Porto

Electrónica de Potência

Sérgio Santos, N^o: 1020881

2 de Julho de 2020

Conteúdo

Montagens $P2$ e $PD2$.

Considere a seguinte montagem $P2$ da Figura 2 Suponha V_s = tensão da rede eléctrica nacional (230V 50Hz).

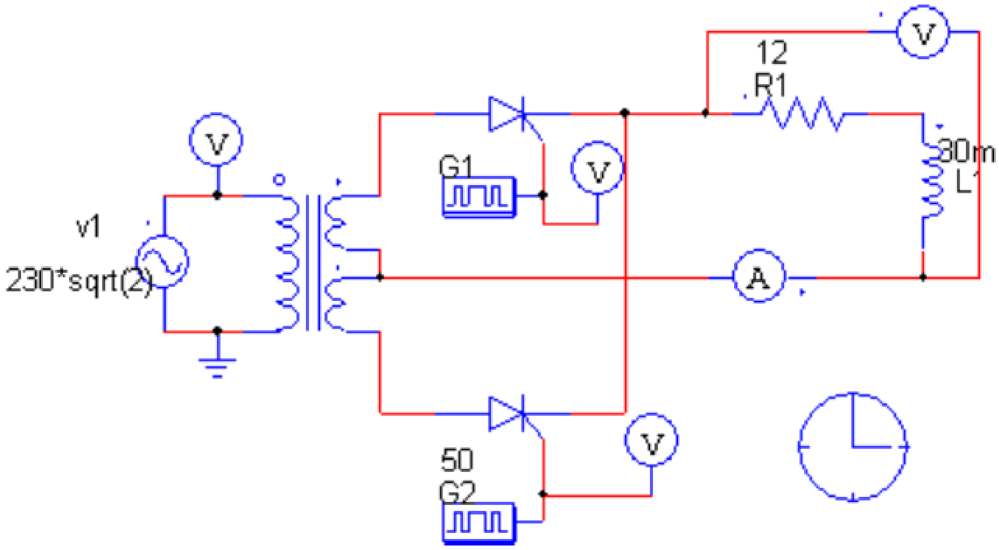

Figura 1: Montagem paralela dupla controlada

1 Suponha o transformador ideal, com a relação de transformação entre enrolamentos de 1 : 1 e que o ângulo de disparo dos tirístores é aos 100° graus.

$R = 12\Omega$; $\quad L = 30 \times 10^{-3}\mathbb{H}$

Dados passivos do circuito, como constitui de os elementos RL em serie, podemos adquirir a constante de tempo $\tau = \frac{L}{R}$ a sua impedância $\overrightarrow{Z} = R + j\omega L$ e o desfazamento de regime permanente $\phi_p = \arctan(\frac{\omega L}{R})$.

Nos é dado o ângulo de disparo de $\alpha = 100^\circ$ graus e que o circuito tem alimentação da rede elétrica, daqui sabemos que a frequência é de 50Hz e $V_{máx} = 230$ da sinusoide. Respetivamente adquirimos a velocidade ângular $\omega = 2\pi 50$ rad/sec.

Com o ângulo de disparo podemos calcular o avanço da corrente em regime transitório para isso ωt é calculado para $C_T\, e^{\frac{R}{\omega L} * \omega t} = -\frac{V_{máx}}{Z} \sin(\omega t + \alpha - \phi)$ no intervalo $[0\ ,\ 2\pi]$ como demonstra na secção 3. $\omega t = 1,99219957 \approx 1,990$ radianos, e a corrente é positiva no intervalo respetivo $0^\circ \leq \omega t \leq 114,019^\circ$ em referência ao disparo.

$\phi_n \approx 0,596$ radianos de avanço no regime transitório. E $\phi_p \approx 0,666$ radianos no regime permanente mas neste caso só nos interessa o transitório.

Mais coisas a considerar é que os tirístores são alimentados por fontes em opposição de fase, isto quer dizer que os disparos devem estar desfazados de π radianos e ter disparo com ângulo superior a ϕ_n. O sincronismo dos disparos é crucial para um bom controlo, pois se o segundo tirístor disparar enquanto o primeiro esta em condução dentro do intervalo $[0\ ,\ \pi]$ o segundo tirístor não entra em condução, mas se o disparo é efetuado no intervalo de $[\pi\ ,\ \pi + \phi_n]$ este entrara em sobrecarga, pois as condições iniciais não serão nulas.

1.1 Determine o ângulo e o tempo de condução γ de cada tirístor (especifique a expressão da corrente e determine o tempo de condução com a ajuda do **Excel1**);

Representação gráfica do primeiro disparo, o segundo disparo sera exatamente igual, em que a onda sinusoidal em vez de começar nos 0 radianos ira começar nos π radianos.

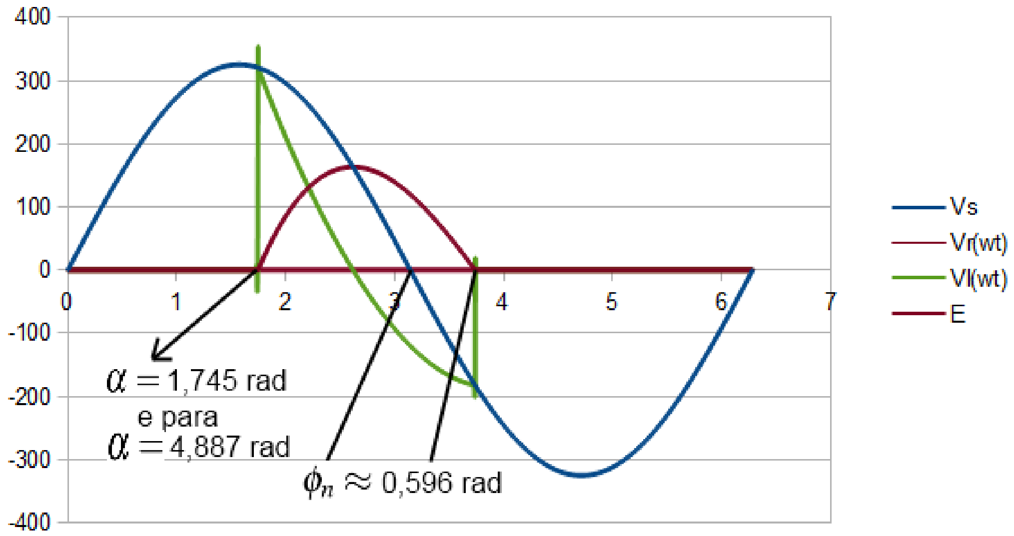

Figura 2: Representação das tensões

O primeiro tirístor ira conduzir de $\alpha \approx 1,745$ rad até $\pi + \phi_n \approx 3,738$ rad, e o segundo tirístor ira conduzir de $\approx 4,887$ rad até $2\pi + \phi_n \approx 6,879$ rad.

Cada tirístore conduz $\gamma \approx 1,993$ rad, que em segundos será $t_c \approx 6,34$ ms num ciclo. A expressao da corrente é como demostrado na seção 3, com $E = 0$, isto é,

$$I(\omega t) = \frac{V_{máx}}{\overline{Z}} \sin(\omega t + \alpha - \phi_p) - \frac{V_{máx}}{\overline{Z}} \sin(\alpha - \phi_p)\, e^{-\frac{R}{L\omega}\omega t} \tag{1}$$

1.2 Identifique e determine a constante de tempo do circuito.

$$\tau = \frac{L}{R} = 2,5ms \tag{2}$$

1.3 Desenhe numa folha anexa a forma de onda da tensão na carga (V_L) e uma possível forma de onda para a corrente (I_L) com os respetivos regimes transitório e permanente.

1.4 Determine o valor médio da tensão V_{Lo}, na carga;

A média é sempre calculada para um ciclo, onde o integral de zero é zero,

$$V_{Loav} = \frac{1}{T}\int_0^T V_L(t)dt \tag{3}$$

$$\begin{aligned} V_L(t) &= L \quad \frac{di_L(t)}{dt} \\ &= L \quad \left(\frac{R\, V_{máx}}{\overline{Z}L} \sin(\alpha - \phi_p)\, e^{-\frac{R}{L}t} + \frac{\omega\, V_{máx}}{\overline{Z}} \cos(\omega t + \alpha - \phi_p) \right) \\ &= \frac{R\, V_{máx}}{\overline{Z}} \sin(\alpha - \phi_p)\, e^{-\frac{R}{L}t} + \frac{\omega\, L\, V_{máx}}{\overline{Z}} \cos(\omega t + \alpha - \phi_p) \end{aligned} \tag{4}$$

$$V_L(\omega t) = \frac{R\, V_{máx}}{\overline{Z}} \sin(\alpha - \phi_p)\, e^{-\frac{R}{\omega L}\omega t} + \frac{\omega\, L\, V_{máx}}{\overline{Z}} \cos(\omega t + \alpha - \phi_p) \tag{5}$$

$$V_{Loav} = \frac{1}{\pi + \phi_n - \alpha} \int_0^{\pi + \phi_n - \alpha} V_L(wt)dt \bigg|_{\alpha \approx 1,745} \tag{6}$$

1.5 Especifique o integral que lhe permite determinar o valor eficaz da corrente I_{Lrms} na carga (não necessita calcular o integral, na aula mas faça-o em casa);

1.6 Considerando $I_{Lrms} = 6$ A, determine a potência dissipada na carga;

1.7 Utilizando o **Excel** represente a potência atribuída à carga $p(t)$ e determine o factor de potência FP. Nota: $p(t) = v(t).i(t)$ e $P = V.I.\cos\phi$.

1.8 Supondo que existe uma f.c.e.m ($E = 100v$) represente as formas de onda da corrente (I_L) e tensão (V_L) na carga.

1.9 Suponha que substitui os tirístores por díodos (montagem PD2) e que a montagem apresenta uma $fcem$ ($E = 100v$). Desenhe numa folha anexa a forma de onda da tensão na carga (V_L) e uma possível forma de onda para a corrente (I_L).

2 PSIM

2.1 Simule os circuitos referidos da aula anterior ($P2$ e $PD2$) para confirmar todos resultados determinados (apresente todas as ondas incluindo os impulsos ás gates dos tirístores).

1. usar a folha **Excel** que obteve no Problema 3;
2. no relatório deverá justificar todas os cálculos e ondas representadas.

Resumo

resumo

3 Equações

3.1 Corrente Continua Condições iniciais nulas.

3.1.1 Circuito LC em $C.C$:

- $i(t) = \frac{V_{DC}\sqrt{LC}}{L} \quad \sin\left(\frac{t}{\sqrt{LC}}\right) \times u(t)$
- $V_L(t) = V_{DC} \quad \cos\left(\frac{t}{\sqrt{LC}}\right) \times u(t)$
- $V_c(t) = V_{DC} \quad \left(1 - \cos\left(\frac{t}{\sqrt{LC}}\right)\right) \times u(t)$
- $\omega_n = \frac{1}{\sqrt{LC}}$
- $\overline{Z} = \sqrt{(\omega_n L - \frac{1}{\omega_n C})^2}$
- $\phi_p = \frac{\pi}{2}$
  porque, $\sin(\omega_n t) = \cos(\omega_n t - \pi/2)$
- $\tau = \infty$

3.1.2 Circuito RLC em $C.C$:

1. Para $\quad C(CR^2 - 4L) > 0 \quad$ (Raízes reais diferentes) Sobreamortecido.

   - $i(t) = \dfrac{2V_{DC}Ce^{\frac{-tR}{2L}}\,sinh\left(\frac{t\sqrt{C(CR^2-4L)}}{2CL}\right)}{\sqrt{C(CR^2-RL)}} \times u(t)$
   - $V_R(t) = R \times i(t)$
   - $V_L(t) = L\dfrac{di(t)}{dt}$

   $$L\left(\frac{Vdc\,\%e^{-\frac{tR}{2L}}\cosh\left(\frac{t\sqrt{C(CR^2-4L)}}{2CL}\right)}{L} - \frac{Vdc\,C\,R\,\%e^{-\frac{tR}{2L}}\sinh\left(\frac{t\sqrt{C(CR^2-4L)}}{2CL}\right)}{L\sqrt{C(CR^2-4L)}}\right)$$

   - $V_C(t) = \frac{1}{C}\int_0^t i(t)$

   $$\frac{2\,Vdc\left(\frac{\sqrt{C^2R^2-4CL}}{2} - \frac{\left(\sqrt{C^2R^2-4CL}\left(\%e^{\frac{t\sqrt{C^2R^2-4CL}}{CL}}+1\right)+C\,R\,\%e^{\frac{t\sqrt{C^2R^2-4CL}}{CL}}-C\,R\right)\%e^{-\frac{t\sqrt{C^2R^2-4CL}}{2CL}-\frac{tR}{2L}}}{4}\right)}{\sqrt{C(CR^2-4L)}}$$

2. Para $\quad C(CR^2 - 4L) = 0 \quad$ (Raízes iguais) Amortecimento crítico.

   - $i(t) = \frac{V_{DC}}{L} \quad t \quad e^{\frac{-Rt}{2L}} \times u(t)$
   - $V_R(t) = R \times i(t)$
   - $V_L(t) = L\dfrac{di(t)}{dt}$

   $$L\left(\frac{Vdc\,\%e^{-\frac{tR}{2L}}}{L} - \frac{t\,Vdc\,R\,\%e^{-\frac{tR}{2L}}}{2L^2}\right)$$

   - $V_C(t) = \frac{1}{C}\int_0^t i(t)$

   $$\frac{Vdc\left(\frac{4L^2}{R^2} - \frac{(2\,t\,L\,R+4L^2)\,\%e^{-\frac{tR}{2L}}}{R^2}\right)}{C\,L}$$

3. Para $\quad C(CR^2-4L)<0 \quad$ (Raízes complexas) $\quad$ Amortecido.

- $i(t)=\dfrac{2V_{DC}Ce^{\frac{-tR}{2L}}\,sin\left(\frac{t\sqrt{-C(CR^2-4L)}}{2CL}\right)}{\sqrt{-C(CR^2-4L)}}\times u(t)$
- $V_R(t)=R\times i(t)$
- $V_L(t)=L\dfrac{di(t)}{dt}$

$$L\left(\frac{Vdc\,\%e^{-\frac{t\,R}{2\,L}}\cos\left(\frac{t\sqrt{-C\,(C\,R^2-4\,L)}}{2\,C\,L}\right)}{L}-\frac{Vdc\,C\,R\,\%e^{-\frac{t\,R}{2\,L}}\sin\left(\frac{t\sqrt{-C\,(C\,R^2-4\,L)}}{2\,C\,L}\right)}{L\sqrt{-C\,(C\,R^2-4\,L)}}\right)$$

- $V_C(t)=\frac{1}{C}\int_0^t i(t)$

$$\frac{2\,Vdc\left(\frac{\sqrt{4\,C\,L-C^2\,R^2}}{2}-\frac{\%e^{-\frac{t\,R}{2\,L}}\left(C\,R\sin\left(\frac{t\sqrt{4\,C\,L-C^2\,R^2}}{2\,C\,L}\right)+\sqrt{4\,C\,L-C^2\,R^2}\cos\left(\frac{t\sqrt{4\,C\,L-C^2\,R^2}}{2\,C\,L}\right)\right)}{2}\right)}{\sqrt{-C\,(C\,R^2-4\,L)}}$$

- $|\omega_n|=\sqrt{\frac{4L-R^2C}{4L^2C}}$
- $\overline{Z}=\sqrt{R^2+(\omega_nL-\frac{1}{\omega_nC})^2}$
- $\phi_p=\arctan\left(\frac{\omega_nL-\frac{1}{\omega_nC}}{R}\right)$
- $\tau=\frac{2L}{R}$

3.2 Corrente Alternada condições iniciais nulas.

3.2.1 Circuito RLE em $C.A$:

- $i(t)=C_T\ e^{-\frac{R}{L}t}+\frac{V_{máx}}{\overline{Z}}\sin(\omega t+\alpha-\phi_p)-\frac{E}{R}$
  $i(t)=C_T\ e^{-\frac{R}{L}t}+C_1\cos(\omega t)+C_2\sin(\omega t)-\frac{E}{R}$
- $I(\omega t)=C_T\ e^{-\frac{R}{L\omega}\omega t}+\frac{V_{máx}}{\overline{Z}}\sin(\omega t+\alpha-\phi_p)-\frac{E}{R}$
- $I'(\omega t)=\frac{V_{máx}}{\overline{Z}}\cos(\omega t+\alpha-\phi_p)-\frac{R\,C_T}{\omega L}\ e^{-\frac{R}{L\omega}\omega t}$
- $\overrightarrow{Z}=R+j\omega L$
  $\overline{Z}=\sqrt{R^2+(\omega L)^2}$
- $\phi_p=\arctan(\frac{\omega L}{R})$
- $C_T=\frac{E}{R}-\frac{V_{máx}}{\overline{Z}}\sin(\alpha-\phi_p)$
- $C_T=\frac{V_{máx}}{R^2+(\omega L)^2}(L\omega\cos(\alpha)-R\sin(\alpha))+\frac{E}{R}$
- $C_1=\frac{V_{máx}}{R^2+(\omega L)^2}(R\sin(\alpha)-L\omega\cos(\alpha))$
- $C_2=\frac{V_{máx}}{R^2+(\omega L)^2}(R\cos(\alpha)+L\omega\sin(\alpha))$

3.3 Definições

Definição 1 *Capacitância*

$$
\begin{aligned}
Q_c(t) =& \int^t i(t) \quad dt \\
=& Q_c(0^-) + \int_{0^-}^t i(t) \quad dt \\
V_c(t) =& \frac{Q_c(t)}{C} \\
=& \frac{1}{C} \quad \int^t i_c(t) \quad dt \\
=& \frac{Q_c(0^-)}{C} + \frac{1}{c} \quad \int_0^t i_c(t) \quad dt \\
=& V(0^-) + \frac{1}{c} \quad \int_0^t i_c(t) \quad dt \\
i_c(t) =& C \quad \frac{dV_c(t)}{dt}
\end{aligned}
$$

Definição 2 *Indutância*

$$
\begin{aligned}
\psi_L(t) =& \int^t V_L(t) \quad dt \\
=& \psi_L(0^-) + \int_{0^-}^t V_L(t) \quad dt \\
V_L(t) =& L \quad \frac{di_L(t)}{dt} \\
i_L(t) =& \frac{\psi_L(t)}{L} \\
=& \frac{1}{L} \quad \int^t V_L(t) \quad dt \\
=& \frac{\psi_L(0^-)}{L} + \frac{1}{L} \quad \int_0^t V_L(t) \quad dt \\
=& i_L(0^-) + \frac{1}{L} \quad \int_0^t V_L(t) \quad dt
\end{aligned}
$$

Definição 3 *Resistência*

$$
\begin{aligned}
V_R(t) =& R \quad i_R(t) \\
i_R(t) =& \frac{V_R(t)}{R}
\end{aligned}
$$

Definição 4 *Valor Médio*

$$X_{av} = \frac{1}{T} \int_0^T X(t)dt$$

Definição 5 *Valor Eficaz*

$$X_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \overset{2}{X}(t)dt}$$

Definição 6 *Quadrática*

$ax^2 + bx + c = 0$

$\left(x + \frac{b}{2a}\right)^2 + \frac{4ac - b^2}{4a^2} = 0$

se $b^2 - 4ac = 0$ $\quad$ *(raízes reias iguais)*

$x = \frac{-b}{2a} \implies (x + \frac{b}{2a})(x + \frac{b}{2a}) = (x + \frac{b}{2a})^2 = 0$

se $b^2 > 4ac$ $\quad$ *(raízes reais compostas)*

$x = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \implies (x + \frac{b - \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a})(x + \frac{b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}) = 0$

se $b^2 < 4ac$ $\quad$ *(raízes compostas imaginarias)*

$x = \frac{-b \pm j\ \sqrt{4ac - b^2}}{2a} \implies (x + \frac{b - j\ \sqrt{4ac - b^2}}{2a})(x + \frac{b + j\ \sqrt{4ac - b^2}}{2a}) = 0$

Lista de Figuras

[]

Referências

[1] *Curso de Introduo ao LATEX*.

[2] *Electrónica Analógica*. McGraw Hill, 1993.

[3] *Cálculo Diferencial e Integral em* $\mathbb{R}$ *e* $\mathbb{R}^n$. McGraw Hill, 1995.

[4] *Power Electronic Converter Harmonics*. IEEE Press Editorial Board, 1996.

[5] *Cálculo Diferencial e Integral*. Lopes da Silva Editora, 1997.

[6] *electromagnetismo*. McGraw Hill, 1999.

[7] *Power Electronic Control in Electrical Systems*. Newnes Power Engeneering Series, 2002.

[8] *The Maxima Book*. , 2004.

[9] *HIGHER ENGINEERING MATHEMATICS*. Published by Elsevier Ltd, 2006.

[10] *PSIM Users Guide*. Powersim Inc., 2009.

[11] *Analog and Digital Control System Design: Transfer-Function, State-Space, and Algebraic Methods*. Harcourt Brace Jovanovich College Publishers, .

[12] *Teach Yourself Electricity and Electronics*. McGraw-Hill, .

[13] Fidalgo, André: *Sistemas Eléctricos de Corrente Alternada*. Em *Unidade de Ensino 2*.

[14] Fidalgo, André: *Sistemas Eléctricos de Corrente Contínua*. Em *Unidade de Ensino 1*.

[1]

[1] Apontamentos Electrónica de Potência