



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

ES664 - Laboratório de Eletrônica para Automação Industrial

Relatório - Experimento 2 Retificadores controlados

Nome:

Daniel Dello Russo Oliveira

Marcelli Tiemi Kian

RA

101918

117892

6 de outubro de 2016

1 Objetivos

Essa relatório tem como objetivo o estudo de retificadores controlados. Analisaremos o efeito do ângulo de disparo e de cargas indutivas na saída de um retificador monofásico controlado.

2 Carga R

Implementamos o retificador monofásico totalmente controlado detalhado no roteiro conforme mostrado na figura 1.

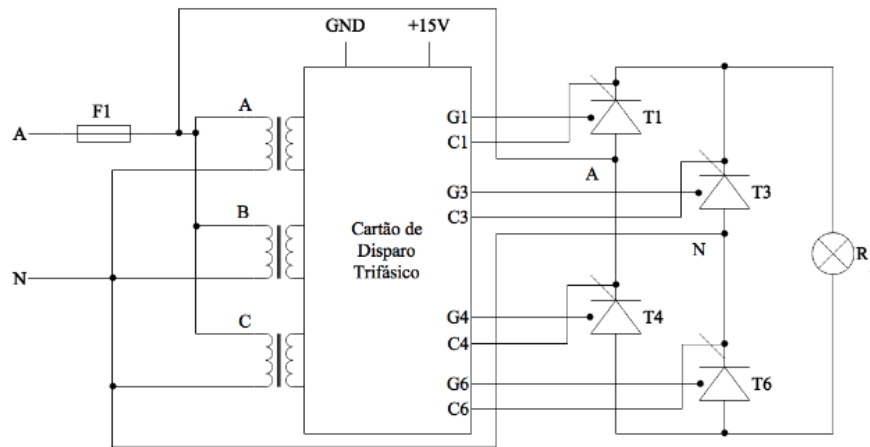


Figura 1: Diagrama para montagem do retificador monofásico de onda completa totalmente controlado

Extraímos a curva de tensão na carga (figura 2) e a tensão nos tiristores 3 (figura 3) e 6 (figura 4) para um ângulo de disparo $\alpha = 60^\circ$.

Figura 2: Tensão na carga para retificador monofásico com carga R

Figura 3: Tensão no tiristor 3 para retificador monofásico com carga R

Figura 4: Tensão no tiristor 6 para retificador monofásico com carga R

Medimos a tensão média e efetiva na carga, obtendo os seguintes valores:

$$\overline{V_o} = 46.6080 \text{ V} \quad (1)$$

$$V_{o_{rms}} = 62.2060 \text{ V} \quad (2)$$

Podemos calcular a tensão média teórica sobre a carga através da equação 3

$$\overline{V_r} = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} V_s \sin(\theta) d\theta = \frac{V_s(1 + \cos(\alpha))}{\pi} \quad (3)$$

Para calcular o valor efetivo da tensão sobre a carga utilizamos a equação 4.

$$V_{r_{rms}} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} (V_s \sin(\theta))^2 d\theta} = \frac{V_s \sqrt{\pi + \frac{\sin(2\alpha)}{2} - \alpha}}{\sqrt{2\pi}} \quad (4)$$

Varrendo o ângulo de disparo α entre 0° e 180° comparamos os valores teóricos e medidos para a tensão (figura 5) e corrente (figura 6) sobre a carga

Figura 5: Tensão na carga média e efetiva em função do ângulo de disparo

Figura 6: Corrente na carga média e efetiva em função do ângulo de disparo

Como podemos ver os valores obtidos são um pouco menores dos que os esperados teoricamente, isso se deve às imprecisões numéricas da simulação, à queda de tensão introduzida pelos diodos, ao pequeno período de amostragem, entre outros fatores.

Calculamos o fator de retificação para um ângulo de disparo $\alpha = 60^\circ$ usando a equação 5.

$$\sigma = \frac{\overline{P}}{P_{rms}} = \frac{\overline{V_r}^2}{V_{r_{rms}}^2} \quad (5)$$

$$\sigma = 0.5614 \quad (6)$$

Encontramos por fim o fator de forma para um ângulo de disparo $\alpha = 60^\circ$ usando a equação 7.

$$FF = \frac{\overline{V_r}}{V_{r_{rms}}} \quad (7)$$

$$FF = 1.3347 \quad (8)$$

3 Carga RL

Conectamos então um indutor em série com o resistor conforme mostrado na figura 7.

Figura 7: Esquema para simulação do retificador monofásico controlado com carga RL

Simulamos o circuito para uma indutância $L = 100mH$ e um ângulo de disparo $\alpha = 60^\circ$. Extraímos dessa simulação as curvas de tensão (figura 8) e corrente (figura 9) no resistor e de tensão no indutor (figura 10) para dois períodos da fonte.

Figura 8: Tensão no resistor para retificador monofásico com carga RL (100mH)

Figura 9: Corrente no resistor para retificador monofásico com carga RL (100mH)

Figura 10: Tensão no indutor para retificador monofásico com carga RL (100mH)

Medimos as tensões e correntes médias e efetivas na resistência R, obtendo os seguintes valores:

$$\overline{Vr} = 40.3318 \text{ V} \quad (9)$$

$$\overline{Ir} = 0.8066 \text{ A} \quad (10)$$

$$Vr_{rms} = 48.1121 \text{ V} \quad (11)$$

$$Ir_{rms} = 0.9622 \text{ A} \quad (12)$$

Calculamos o fator de retificação usando a equação 5.

$$\sigma = 0.7027 \quad (13)$$

Encontramos também o fator de forma usando a equação 7.

$$FF = 1.1929 \quad (14)$$

Simulamos então circuito com uma indutância $L = 1H$ e um ângulo de disparo $\alpha = 60^\circ$. Extraímos dessa simulação as curvas de tensão (figura 11) e corrente (figura 12) no resistor e de tensão no indutor (figura 13) para quinze períodos da fonte.

Figura 11: Tensão no resistor para retificador monofásico com carga RL (1H)

Figura 12: Corrente no resistor para retificador monofásico com carga RL (1H)

Figura 13: Tensão no indutor para retificador monofásico com carga RL (1H)

Medimos as tensões e correntes médias e efetivas na resistência R, obtendo os seguintes valores:

$$\overline{Vr} = 30.1911 \text{ V} \quad (15)$$

$$\overline{Ir} = 0.6038 \text{ A} \quad (16)$$

$$Vr_{rms} = 30.4340 \text{ V} \quad (17)$$

$$Ir_{rms} = 0.6087 \text{ A} \quad (18)$$

Sendo ϕ a defasagem introduzida pela carga indutiva:

$$\phi = \arctan\left(\frac{L\omega}{R}\right) \quad (19)$$

Sabemos que a corrente sobre a carga será da forma durante o intervalo que

existe condução:

$$i(\omega t) = \frac{V_s}{Z}(\sin(\omega t - \phi)) - \sin(\alpha - \phi)e^{\frac{R}{L}(t - \frac{\alpha}{\omega})} \quad (20)$$

Supondo um ângulo de extinção γ teremos:

$$i(\pi + \gamma) = 0 = \frac{V_s}{Z}(\sin(\pi + \gamma - \phi)) - \sin(\alpha - \phi)e^{-\frac{R}{L}(\frac{\pi + \gamma - \alpha}{\omega})} \quad (21)$$

Logo:

$$0 = \sin(\pi + \gamma - \phi) - \sin(\alpha - \phi)e^{-\frac{\pi + \gamma - \alpha}{\tan(\phi)}} \quad (22)$$

Podemos calcular a tensão média teórica sobre a carga através da equação 23

$$\overline{V_r} = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi + \min(\alpha, \gamma)} V_s \sin(\theta) d\theta = \frac{V_s(-\cos(\pi + \min(\alpha, \gamma)) + \cos(\alpha))}{\pi} \quad (23)$$

Para calcular o valor efetivo da tensão sobre a carga utilizamos a equação 24.

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi + \min(\alpha, \gamma)} (V_s \sin(\theta))^2 d\theta} \quad (24)$$

$$V_{rms} = \frac{V_s \sqrt{\pi + \min(\alpha, \gamma) + \frac{\sin(2\alpha)}{2} - \frac{\sin(2(\pi + \min(\alpha, \gamma)))}{2}}}{\sqrt{2\pi}} - \alpha \quad (25)$$

Calculamos o fator de retificação usando a equação 5.

$$\sigma = 0.9841 \quad (26)$$

Encontramos também o fator de forma usando a equação 7.

$$FF = 1.0080 \quad (27)$$

Podemos ver que ao introduzir uma carga indutiva os tiristores continuam conduzindo mesmo que a tensão sobre eles seja negativa (contanto que a corrente continue positiva). Isso causa uma redução da tensão média na carga. Ao mesmo tempo, o indutor, uma vez carregado evita variações bruscas na corrente sobre a carga (possivelmente evitando que ela chegue a zero), aumentando o alisamento (e consequentemente melhorando o fator de forma e o de retificação) de maneira proporcional ao valor da indutância.

Para os dois valores de indutância nós medimos uma tensão média prática-

mente nula no indutor. Esse resultado é esperado uma vez que:

$$\overline{Vl} = \frac{1}{T} \int_0^T V l dt = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{L dI}{dt} dt = \frac{LI}{T} \Big|_0^T \quad (28)$$

Como nossa resposta é periódica, sabemos que $I(0) = I(T)$ logo:

$$\overline{Vl} = 0 \quad (29)$$

4 Carga RC

Conectamos então um capacitor em paralelo com o resistor conforme mostrado na figura 14.

Figura 14: Esquema para simulação do retificador monofásico controlado com carga RC

Simulamos o circuito para uma capacitância $C = 100\mu F$ e um ângulo de disparo $\alpha = 60^\circ$. Extraímos dessa simulação as curvas de tensão (figura 15) e corrente (figura 16) no resistor para dois períodos da fonte.

Figura 15: Tensão no resistor para retificador monofásico com carga RC ($100\mu F$)

Figura 16: Corrente no resistor para retificador monofásico com carga RC ($100\mu F$)

Medimos as tensões e correntes médias e efetivas na resistência R, obtendo os seguintes valores:

$$\overline{Vr} = 60.6456 \text{ V} \quad (30)$$

$$\overline{Ir} = 1.2129 \text{ A} \quad (31)$$

$$Vr_{rms} = 67.1804 \text{ V} \quad (32)$$

$$Ir_{rms} = 1.3436 \text{ A} \quad (33)$$

Calculamos o fator de retificação usando a equação 5.

$$\sigma = 0.8149 \quad (34)$$

Encontramos também o fator de forma usando a equação 7.

$$FF = 1.1078 \quad (35)$$

Simulamos então circuito com uma capacitância $C = 1mF$ e um ângulo de disparo $\alpha = 60^\circ$. Extraímos dessa simulação as curvas de tensão (figura 17) e corrente (figura 18) no resistor para dois períodos da fonte.

Figura 17: Tensão no resistor para retificador monofásico com carga RC ($1mF$)

Figura 18: Corrente no resistor para retificador monofásico com carga RC ($1mF$)

Medimos as tensões e correntes médias e efetivas na resistência R, obtendo os seguintes valores:

$$\overline{Vr} = 92.0838 \text{ V} \quad (36)$$

$$\overline{Ir} = 1.8417 \text{ A} \quad (37)$$

$$Vr_{rms} = 92.1690 \text{ V} \quad (38)$$

$$Ir_{rms} = 1.8434 \text{ A} \quad (39)$$

Calculamos o fator de retificação usando a equação 5.

$$\sigma = 0.9982 \quad (40)$$

Encontramos também o fator de forma usando a equação 7.

$$FF = 1.0009 \quad (41)$$

Ao introduzir uma carga capacitiva esta armazenará energia, liberando-a quando a tensão sobre o resistor diminuí. Essa energia liberada causa uma

retificação da tensão sobre o resistor, de maneira proporcional à capacitância, obtendo uma curva de tensão quase linear com ótimos fatores de forma e de retificação.

5 Referências

[FUJIWARA, 2016] FUJIWARA, E. **Retificadores controlados**. Roteiro Simulação 2, Unicamp/FEM/DSI, 2016.