3.4整流电路的谐波和功率因数

3.4.1正弦电路的功率和功率因数

$$u = u_1 = \sqrt{2}U_1 \sin\omega t$$

$$i = i_1 = \sqrt{2}I_1 \sin(\omega t - \phi_1)$$

功率瞬时值为：

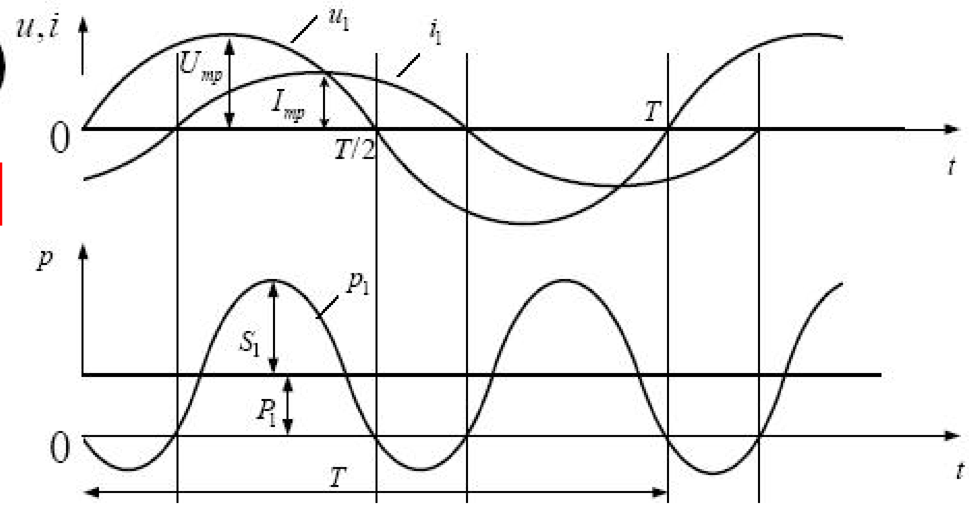
$$p = p_1 = u_1 i_1 =$$

$$2U_1 I_1 \sin\omega t \sin(\omega t - \phi_1)$$

$$= U_1 I_1 【\cos\phi_1 - \cos(2\omega t - \phi_1)】$$

$$= P_1 - S_1 \cos(2\omega t - \phi_1)$$

$$= P_{dc} + P_{ac}$$



P_1称基波有功功率，S_1称基波表现功率

P_{ac}称瞬时功率的交流分量

$$P_1 = P_{dc} = U_1 I_1 \cos\phi_1$$

$$S_1 = U_1 I_1 = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T u_1^2 dt} \bullet \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T i_1^2 dt}$$

$$P_{ac} = -S_1 \cos(2\omega t - \phi_1)$$

电路功率的平均值为

$$P = \frac{1}{T}\int_0^T p dt = \frac{1}{T}\int_0^T P_{\mathrm{dc}} dt + \frac{1}{T}\int_0^T P_{\mathrm{ac}} dt$$

$$= U_1 I_1 \cos\phi_1 = P_{\mathrm{dc}} = P_1$$

- 瞬时功率的交流分量P_{ac}以二倍于电源的频率变化不能产生有效功率。产生有效功率的只有直流分量P_{dc}，故$P_{dc}=P_1$

- 就是说：电路基波有功功率的数值与平均功率相等。电路基波无功功率为

$$Q_1 = S_1 \sin\phi_1 = \sqrt{S_1^2 - P_1^2}$$

- 功率因数λ：有功功率P与表观功率S之比

$$\lambda = \frac{P}{S} = \frac{\frac{1}{T}\int_0^T p dt}{\sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T u^2 dt} \cdot \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T i^2 dt}}$$

- 对于正弦电路有$P=P_1$，$S=S_1$

$$\lambda = P_1 / S_1 = \cos\phi_1$$

- 正弦电路中功率因数λ可用位移因数$\cos\phi_1$表示。

3.4.2非正弦电路的功率因数和电流谐波

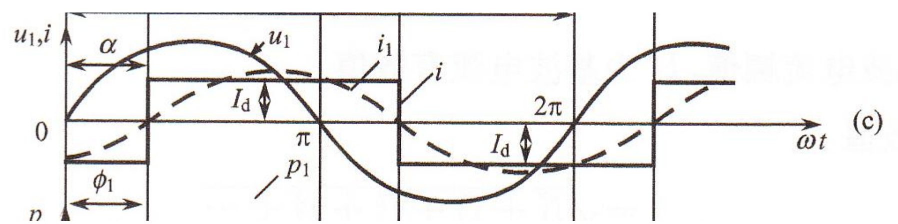
- 相控式整流电路 控制角α>0

$$u = u_1 = \sqrt{2}U_1 \sin\omega t$$

$$i = I_{1\mathrm{m}} \sin(\omega t - \phi_1) + \sum_{n}^{\infty} I_{\mathrm{nm}} \sin(\omega t - \phi_n)\Big|_{n=3,5,7,9,11,\cdots}$$

基波电流幅值 $I_{1\mathrm{m}} = \dfrac{4}{\pi} I_{\mathrm{d}} = \sqrt{2} I_1$

I_1为基波电流有效值



电流有效值： $I=\sqrt{I_1^2+I_3^2+I_5^2+I_7^2+\cdots}$

基波瞬时功率： $P_1=u_1 i_1=$

$$\sqrt{2}U_1\sin\omega t\bullet\sqrt{2}I\sin(\omega t-\phi_1)$$

$$=P_1-S_1\cos(2\omega t-\phi_1)$$

表观功率： $S=UI=U_1 I$

$$=U_1\sqrt{I_1^2+I_3^2+I_5^2+I_7^2+\cdots}$$

有功功率： P=λS

功率因数：$\lambda = P/S = P_1S = S_1\cos\phi_1/S$

$$= I_1/I\cos\phi_1 = \xi\cos\phi_1$$

ξ 为电流波形正弦因数，表征电流对正弦的偏离度：

$$\xi = I_1/I = \frac{I_1}{\sqrt{I_1^2 + \sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}} \overset{?}{=} \frac{1}{\sqrt{1 + \sum_{n=2}^{\infty}\left(\frac{I_n}{I_1}\right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + THD^2}}$$

$$THD = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty}\left(\frac{I_n}{I_1}\right)^2}$$，表示电流总谐波含量

- 结论：网侧功率因数λ是基波位移因数cosφ$_1$和电流波形正弦因数的ξ乘积

- 无功功率：$Q=\sqrt{S^2-P^2}=S\sqrt{1-\lambda^2}$

- 功率因数时交流设备的重要技术指标之一

3.4.3基波相位移ϕ_1与控制角α间的关系

- 输出电感滤波的单相桥式整流电路
- 基波相位角等于控制角α， $\phi_1=\alpha$

可知相控整流：
（1）深控下（控制角α趋于$\pi/2$）的整流电路，功率因数势必很低，这意味着输出有功功率降低的同时，整流电路每相由电网吸取基波无功功率，Q_1却相应增大。这是相控式整流电路的缺点；
（2）对有源逆变电路，控制角α越小则功率因数也越低，为此，最大控制角α_m不能太小。

3.4.4脉波数m对功率因数λ的影响

对 m=2 的单相桥式整流电路，基波电流有效值为

$$I_1 = \frac{I_{1m}}{\sqrt{2}} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} I_d$$

而电流有效值

$$I = \sqrt{\frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} i_2 d\omega t} = I_d$$

电流波形正弦因数 $\xi = \frac{I_1}{I} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} = 0.9$

- 对三相桥式整流电路（m=6）

- 电流波形正弦因数为

$$\xi=\frac{I_{A1}}{I_A}=\frac{\sqrt{6}I_d}{\pi}/\sqrt{\frac{2}{3}}I_d=\frac{3}{\pi}=0.955$$

- 结论：随着脉波数m值得提高，入端电流电流波形正弦因数ξ也接近于1，在m值较高的电路可近似为：$\lambda \approx \cos\phi_1$。

3.4.5电流谐波对电网的不良影响

- 三相全桥整流电路 入端电流

$$i_{\mathrm{A}} = I_{\mathrm{A1m}}\left(\sin\omega t - \frac{1}{5}\sin 5\omega t - \frac{1}{7}\sin 7\omega t + \cdots + \frac{1}{n}\sin n\omega t\right)$$

- 网侧高次谐波电流的存在，使电路产生畸变功率D，增加了电路的无功功率Q。