応用電力変換工学

舟木剛

第9回　本日のテーマ

交流-交流変換

TCRからサイクロコンバータまで

平成16年12月22日

交流電圧制御

- 交流電源(ac)から交流負荷(ac)に直接変換
  - 電圧
  - 電流
  - 平均電力
- 適用例
  - 調光器(白熱電灯用)
  - 電動機の速度制御

単相交流電圧制御

- 回路図
  - サイリスタの逆並列接続
    - 電流を双方向に流す
      - 同時にオンしない
    - トライアックでも可
    - 半波対称な動作
      - ゲート信号を正・負各半波で与える
      - 平均電流は0
        - » 但し，各サイリスタの平均電流は0とならない
        - » 各サイリスタ電流の実効値は，負荷電流実効値の $1/\sqrt{2}$(1/2でないことに注意)

単相交流電圧制御

- 出力電圧
  - 電源電圧 $v_s(t) = V_m \sin\omega t$
  - 出力電圧
    - 点弧角 α
    - 実効値

$$v_O(t) = \begin{cases} V_m \sin\omega t & \alpha \le \omega t < \pi, \alpha + \pi \le \omega t < 2\pi \\ 0 & \omega t < \alpha, \pi \le \omega t < \alpha + \pi \end{cases}$$

$$V_{o,rms} = \sqrt{\frac{\omega}{\pi}\int_{\alpha/\omega}^{\pi/\omega}\left[V_m \sin\omega t\right]^2 dt} = \sqrt{\frac{\omega V_m{}^2}{\pi}\int_{\alpha/\omega}^{\pi/\omega}\frac{1-\cos 2\omega t}{2}dt}$$

$$= \sqrt{\frac{\omega V_m{}^2}{2\pi}\left[1 - \frac{\sin 2\omega t}{2\omega}\right]_{\alpha/\omega}^{\pi/\omega}} = \sqrt{\frac{\omega V_m{}^2}{2\pi}\left[\frac{\pi-\alpha}{\omega} - \frac{\sin 2\pi - \sin 2\alpha}{2\omega}\right]_{\alpha/\omega}^{\pi/\omega}}$$

$$= \frac{V_m}{\sqrt{2}}\sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi}}$$

- α=0で正弦波

単相交流電圧制御

- 出力
  - 電流実効値

$$I_{orms} = \frac{V_{orms}}{R}$$

  - 電源からみた負荷力率

$$pf = \frac{P}{S} = \frac{P}{V_{srms} I_{srms}} = \frac{{V_{orms}}^2 / R}{V_{srms} \, {V_{orms}} / R} = \frac{V_{orms}}{V_{srms}} = \frac{\frac{V_m}{\sqrt{2}}\sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi}}}{\frac{V_m}{\sqrt{2}}} = \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi}}$$

    - 力率1となるのはα=0。それ以外では1以下
    - 抵抗負荷なので，負荷だけ見ると力率1
  - サイリスタ
    - 電流平均値
    - 電流実効値

$$I_{SCRavg} = \frac{\omega}{2\pi}\int_{\alpha/\omega}^{\pi/\omega} \frac{V_m \sin \omega t}{R} dt = \frac{V_m}{2\pi R}\left[1 + \cos \alpha\right]$$

$$I_{SCRrms} = \sqrt{\frac{\omega}{2\pi}\int_{\alpha/\omega}^{\pi/\omega} \left[\frac{V_m \sin \omega t}{R}\right]^2 dt} = \frac{V_{orms}}{\sqrt{2}R} = \frac{I_{orms}}{\sqrt{2}}$$

単相交流電圧制御

- フーリエ級数展開 $v(t)=a_0+\sum_{n=1}^{\infty}\left[a_n\cos n\omega t+b_n\sin n\omega t\right]$

$$a_0=\frac{\omega}{2\pi}\int_0^{\frac{2\pi}{\omega}}v(t)dt=\frac{\omega}{2\pi}\left[\int_{\frac{\alpha}{\omega}}^{\frac{\pi}{\omega}}V_m\sin\omega t dt+\int_{\frac{\alpha+\pi}{\omega}}^{\frac{2\pi}{\omega}}V_m\sin\omega t dt\right]=0$$

$$a_n=\frac{\omega}{\pi}\int_0^{\frac{2\pi}{\omega}}v(t)\cos n\omega t dt=\frac{\omega}{\pi}\left[\int_{\frac{\alpha}{\omega}}^{\frac{\pi}{\omega}}V_m\sin\omega t\cos n\omega t dt+\int_{\frac{\alpha+\pi}{\omega}}^{\frac{2\pi}{\omega}}V_m\sin\omega t\cos n\omega t dt\right]$$

$$=\frac{\omega}{\pi}\left[\int_{\frac{\alpha}{\omega}}^{\frac{\pi}{\omega}}\frac{V_m}{2}\{\sin(1-n)\omega t+\sin(1+n)\omega t\}dt+\int_{\frac{\alpha+\pi}{\omega}}^{\frac{2\pi}{\omega}}\frac{V_m}{2}\{\sin(1-n)\omega t+\sin(1+n)\omega t\}dt\right]$$

$$=\frac{V_m}{2\pi}\left\{\left[-\frac{\cos(1-n)\omega t}{1-n}-\frac{\cos(1+n)\omega t}{1+n}\right]_{\frac{\alpha}{\omega}}^{\frac{\pi}{\omega}}+\left[-\frac{\cos(1-n)\omega t}{1-n}-\frac{\cos(1+n)\omega t}{1+n}\right]_{\frac{\alpha+\pi}{\omega}}^{\frac{2\pi}{\omega}}\right\}$$

$$=\frac{2V_m}{\pi}\left\{-\frac{\left[1+(-1)^{n+1}\right]\left[1-\cos(1-n)\alpha\right]}{1-n}-\frac{\left[1+(-1)^{n+1}\right]\left[1-\cos(1+n)\alpha\right]}{1+n}\right\}$$

$$b_n=\frac{\omega}{\pi}\int_0^{\frac{2\pi}{\omega}}v(t)\sin n\omega t dt=\frac{\omega}{\pi}\left[\int_{\frac{\alpha}{\omega}}^{\frac{\pi}{\omega}}V_m\sin\omega t\sin n\omega t dt+\int_{\frac{\alpha+\pi}{\omega}}^{\frac{2\pi}{\omega}}V_m\sin\omega t\sin n\omega t dt\right]$$

$$=\frac{\omega}{\pi}\left[\int_{\frac{\alpha}{\omega}}^{\frac{\pi}{\omega}}\frac{V_m}{2}\{\cos(1-n)\omega t-\cos(1+n)\omega t\}dt+\int_{\frac{\alpha+\pi}{\omega}}^{\frac{2\pi}{\omega}}\frac{V_m}{2}\{\cos(1-n)\omega t-\cos(1+n)\omega t\}dt\right]$$

$$=\frac{V_m}{2\pi}\left\{\left[-\frac{\sin(1-n)\omega t}{1-n}-\frac{\sin(1+n)\omega t}{1+n}\right]_{\frac{\alpha}{\omega}}^{\frac{\pi}{\omega}}+\left[-\frac{\sin(1-n)\omega t}{1-n}-\frac{\sin(1+n)\omega t}{1+n}\right]_{\frac{\alpha+\pi}{\omega}}^{\frac{2\pi}{\omega}}\right\}$$

$$=\frac{2V_m}{\pi}\left\{-\frac{\left[1+(-1)^{n+1}\right]\sin(1-n)\alpha}{1-n}+\frac{\left[1+(-1)^{n+1}\right]\sin(1+n)\alpha}{1+n}\right\}$$

単相交流電圧制御(誘導負荷)

- 回路図
  - 点弧角 α で点弧した時の応答(電流波形)
    - オン時の回路方程式

$$V_m \sin \omega t = R i_o(t) + L \frac{d i_o(t)}{dt}$$

半波整流参照

$$i_o(t) = \begin{cases} \dfrac{V_m}{Z}\left[\sin(\omega t - \theta) - \sin(\alpha - \theta) e^{\alpha - \omega t / \omega\tau}\right] & \alpha \le \omega t \le \beta \\ 0 & 0 \le \omega t < \alpha, \le \beta < \omega t \le 2\pi \end{cases}$$

$$Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2} \qquad \tan\theta = \frac{\omega L}{R}$$

- 消弧角 $i_o\left(\beta / \omega\right) = \dfrac{V_m}{Z}\left[\sin(\beta - \theta) - \sin(\alpha - \theta) e^{\alpha - \beta / \omega\tau}\right] = 0$

単相交流電圧制御（誘導負荷）

- 導通角 $\gamma = \beta - \alpha$
  - 導通期間中は，印加電圧の極性が反転していても，他方のバルブはオンできない。（逆バイアスされるため）
    - 点弧角の制約 $\alpha \geq \beta - \pi$
      - $\beta - \alpha = \pi$ の時，180度導通となる
- 出力電流実効値

$$I_{o,rms} = \sqrt{\frac{\omega}{\pi}\int_{\alpha/\omega}^{\beta/\omega} i_o^{\ 2}(t)dt}$$

- バルブ電流実効値

$$I_{SCR,rms} = \frac{I_{o,rms}}{\sqrt{2}}$$

- 出力電力

$$P = I_{o,rms}^{\ \ 2} R$$

三相交流電圧制御

- Y接続回路（抵抗負荷）
  - 回路図
    - 負荷に印加される電圧は，入力電圧と導通しているSCRの組み合わせで決まる
      - 平衡負荷において
      - 3組オン時，負荷の相電圧は入力の各相電圧に一致
      - 2組オン時，負荷の相電圧は入力線間電圧の半分に一致
      - 1組オン時　導通経路がなくなるので，状態無し
      - 0組オン時，負荷電圧零
    - 0<α<60度　2or3組のSCRが導通
    - 60<α<90度　常に2組のSCRが導通
    - 90<α<150度　2or0組のSCRが導通
    - 150度<α　SCRが導通することはない（逆バイアス）

三相交流電圧制御

- Δ接続回路
  - 制御角（α）は線間電圧基準
    - Y接続のときより，動作は分りやすい
  - Lを接続した場合，SCと組み合わせてTCR-SVC
- サイクロコンバータ回路
  - 出力の周波数は，入力電圧の1/3以下
  - 変換器の消費する無効電力大
  - 高調波大
  - 負荷電流の極性反転時の取り扱い難しい