

パワーエレクトロニクス

(舟木担当分)

第四回 自励式変換器 電流型・電圧型

平成22年06月28日月曜日 3限目

1

パワーエレクトロニクス授業構成

- 第一回(05/30) ダイオード整流回路
 - AC-DC変換, 回路方式, 抵抗負荷・誘導負荷・容量負荷
- 第二回(06/06) サイリスタ位相制御回路
 - AC-DC変換, 回路方式, 点弧角制御
- 第三回(06/20) サイリスタ位相制御回路
 - 転流, 転流重なり, DC-AC変換, 逆変換動作
- 第四回(06/27) 自励式変換器
 - 電圧型・電流型
- 第五回(07/04) 自励式変換器
 - PWM制御, 高調波
- 第六回(07/11) 応用回路
 - 蛍光灯インバータ・モータ駆動回路など

位相制御三相全波整流回路

- 抵抗負荷

- 負荷には線間電圧が印加される

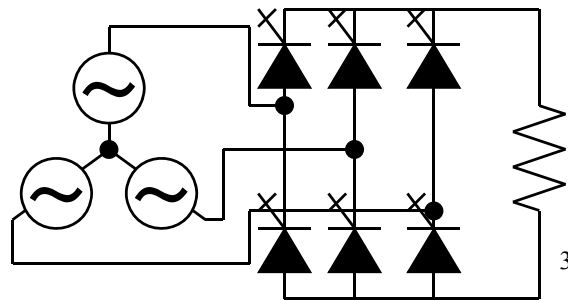
- 相電圧

- 三相平衡

- 線間電圧

$$\begin{cases} v_a = V \sin \omega t \\ v_b = V \sin(\omega t - \frac{2}{3} \pi) \\ v_c = V \sin(\omega t + \frac{2}{3} \pi) \end{cases}$$

$$\begin{cases} v_{ab} = v_a - v_b = V \left\{ \sin \omega t - \sin(\omega t - \frac{2}{3} \pi) \right\} = \sqrt{3} V \sin(\omega t + \frac{\pi}{6}) \\ v_{bc} = v_b - v_c = V \left\{ \sin(\omega t - \frac{2}{3} \pi) - \sin(\omega t + \frac{2}{3} \pi) \right\} = \sqrt{3} V \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) \\ v_{ca} = v_c - v_a = V \left\{ \sin(\omega t + \frac{2}{3} \pi) - \sin(\omega t - \frac{2}{3} \pi) \right\} = \sqrt{3} V \sin(\omega t + \frac{5}{6} \pi) \\ v_{ba} = -v_{ab} = \sqrt{3} V \sin(\omega t - \frac{5}{6} \pi) \\ v_{cb} = -v_{bc} = \sqrt{3} V \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}) \\ v_{ac} = -v_{ca} = \sqrt{3} V \sin(\omega t - \frac{\pi}{6}) \end{cases}$$

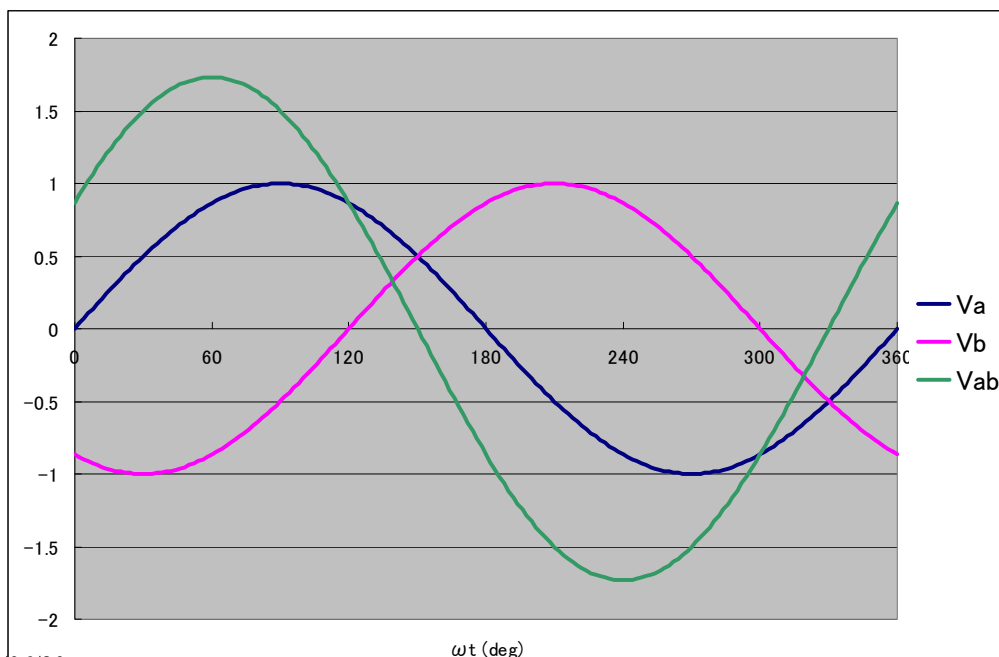


2011/06/20

位相制御三相全波整流回路

- 抵抗負荷

- 負荷には線間電圧が印加される



2011/06/20

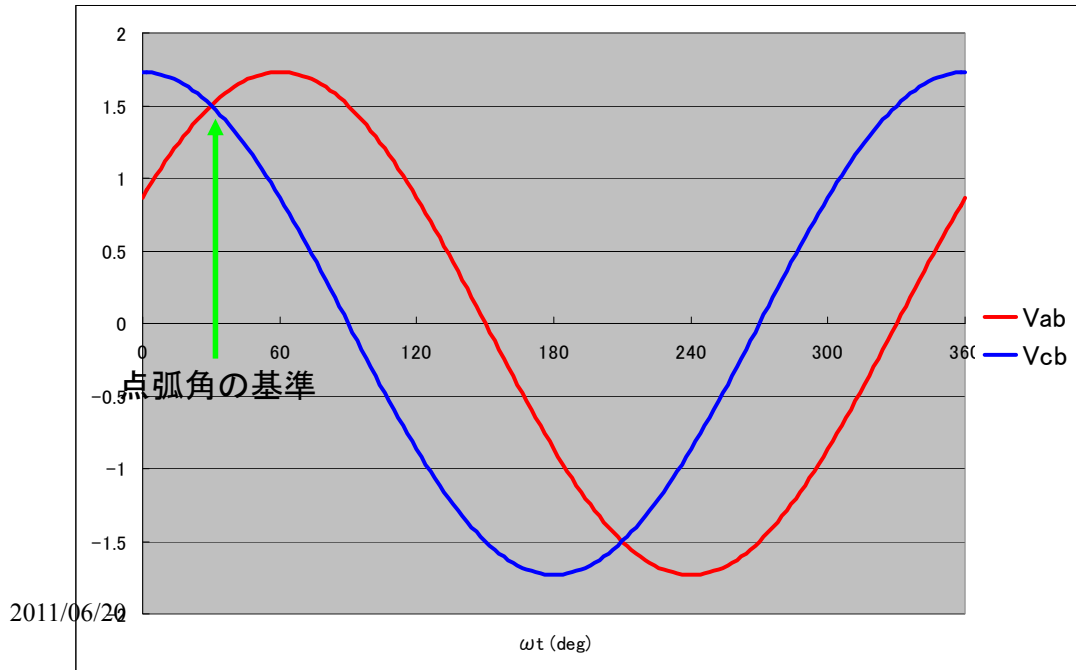
4

位相制御三相全波整流回路

- 抵抗負荷

- 点弧角

- 線間電圧の零クロス点を基準 ($0 < \alpha < \pi$)

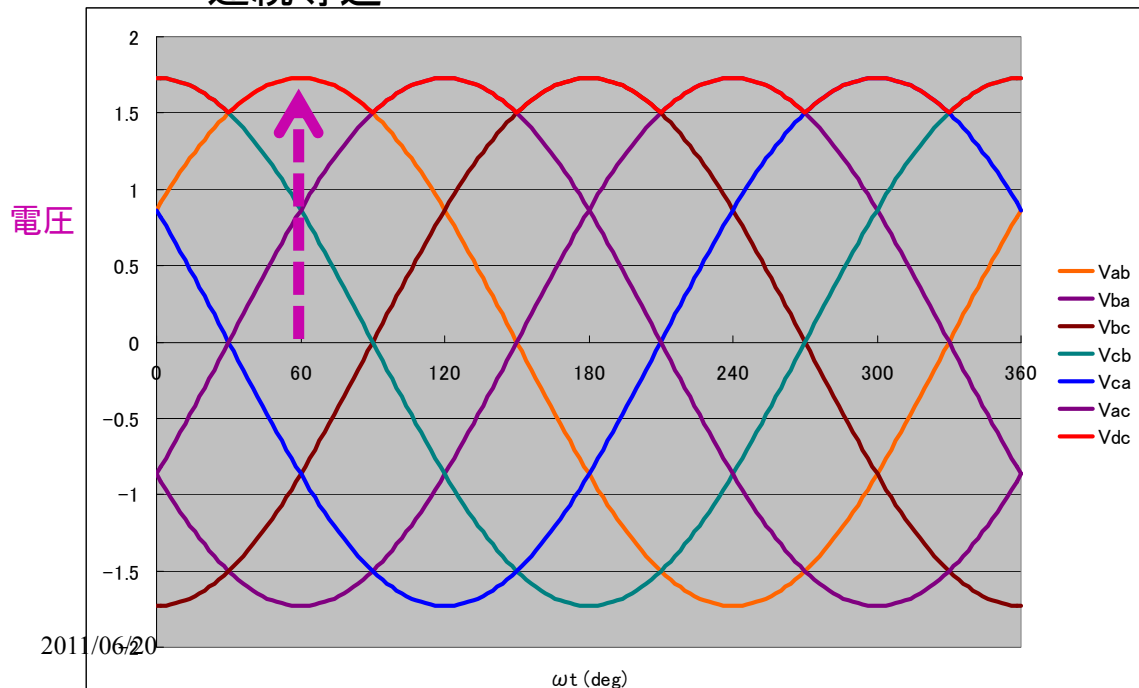


位相制御三相全波整流回路

- 抵抗負荷

- 点弧角 $\alpha=0$ 度 (ダイオード整流回路と同じ)

- 連続導通 ゲート信号は1/6周期毎

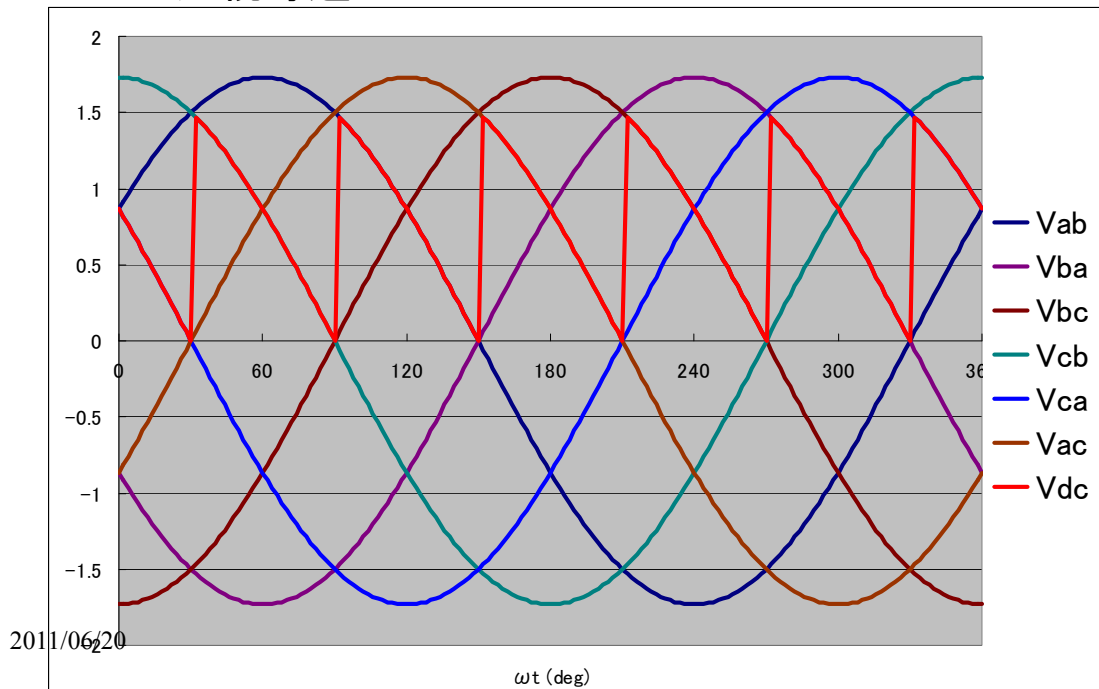


位相制御三相全波整流回路

- 抵抗負荷

- 点弧角 $\alpha=60^\circ$

- 連続導通



位相制御三相全波整流回路

- 抵抗負荷

- 点弧範囲

- $0^\circ \leq \alpha < 120^\circ$

- $0^\circ \leq \alpha < 180^\circ$ の間 $V_{ab} > V_{cb}$ である

- $120^\circ < \alpha$ で $V_{ab} < 0$ となる

- » 逆バイアスとなるので点弧できない

- 連続導通範囲

- $0^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$

- 不連続導通範囲

- $60^\circ \leq \alpha < 120^\circ$

- 単相全波回路の場合

- 点弧範囲

- $0^\circ \leq \alpha < 180^\circ$

- 連続導通となる条件

- » $0 = \alpha$

位相制御三相全波整流回路

• 抵抗負荷

– 直流平均出力電圧

- 連続導通の範囲 ($0^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$)

$$\begin{aligned}
 E_d &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} e_d d\omega t \\
 &= \frac{1}{2\pi} \left[\int_0^{\frac{\pi}{6}+\alpha} v_{cb} d\omega t + \int_{\frac{\pi}{6}+\alpha}^{\frac{\pi}{2}+\alpha} v_{ab} d\omega t + \int_{\frac{\pi}{2}+\alpha}^{\frac{5\pi}{6}+\alpha} v_{ac} d\omega t \right. \\
 &\quad \left. + \int_{\frac{5\pi}{6}+\alpha}^{\frac{7\pi}{6}+\alpha} v_{bc} d\omega t + \int_{\frac{7\pi}{6}+\alpha}^{\frac{3\pi}{2}+\alpha} v_{ba} d\omega t + \int_{\frac{3\pi}{2}+\alpha}^{\frac{11\pi}{6}+\alpha} v_{ca} d\omega t + \int_{\frac{11\pi}{6}+\alpha}^{2\pi} v_{cb} d\omega t \right] \\
 &= \frac{6}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{6}+\alpha}^{\frac{\pi}{2}+\alpha} \sqrt{3}V \sin(\omega t + \frac{\pi}{6}) d\omega t \\
 &= \frac{3\sqrt{3}V}{\pi} \left[-\cos(\omega t + \frac{\pi}{6}) \right]_{\frac{\pi}{6}+\alpha}^{\frac{\pi}{2}+\alpha} \\
 &= \frac{3\sqrt{3}V}{\pi} \left[-\cos(\frac{\pi}{2} + \alpha + \frac{\pi}{6}) + \cos(\frac{\pi}{6} + \alpha + \frac{\pi}{6}) \right] \\
 &= \frac{3\sqrt{3}V}{\pi} \cos \alpha
 \end{aligned}$$

2011/06/20

9

位相制御三相全波整流回路

• 抵抗負荷

– 直流平均出力電圧

- 不連続導通の範囲 ($60^\circ \leq \alpha < 120^\circ$)

$$\begin{aligned}
 E_d &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} e_d d\omega t \\
 &= \frac{1}{2\pi} \left[\int_0^{\frac{\pi}{2}} v_{cb} d\omega t + \int_{\frac{\pi}{6}+\alpha}^{\frac{5\pi}{6}} v_{ab} d\omega t + \int_{\frac{\pi}{2}+\alpha}^{\frac{3\pi}{2}} v_{ac} d\omega t \right. \\
 &\quad \left. + \int_{\frac{5\pi}{6}+\alpha}^{\frac{11\pi}{6}} v_{bc} d\omega t + \int_{\frac{7\pi}{6}+\alpha}^{\frac{13\pi}{6}} v_{ba} d\omega t + \int_{\frac{3\pi}{2}+\alpha}^{\frac{5\pi}{2}} v_{ca} d\omega t + \int_{\frac{11\pi}{6}+\alpha}^{2\pi} v_{cb} d\omega t \right] \\
 &= \frac{6}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{6}+\alpha}^{\frac{5\pi}{6}} \sqrt{3}V \sin(\omega t + \frac{\pi}{6}) d\omega t \\
 &= \frac{3\sqrt{3}V}{\pi} \left[-\cos(\omega t + \frac{\pi}{6}) \right]_{\frac{\pi}{6}+\alpha}^{\frac{5\pi}{6}} \\
 &= \frac{3\sqrt{3}V}{\pi} \left[-\cos(\frac{5\pi}{6} + \frac{\pi}{6}) + \cos(\frac{\pi}{6} + \alpha + \frac{\pi}{6}) \right] \\
 &= \frac{3\sqrt{3}V}{\pi} \left[1 + \cos(\frac{\pi}{3} + \alpha) \right]
 \end{aligned}$$

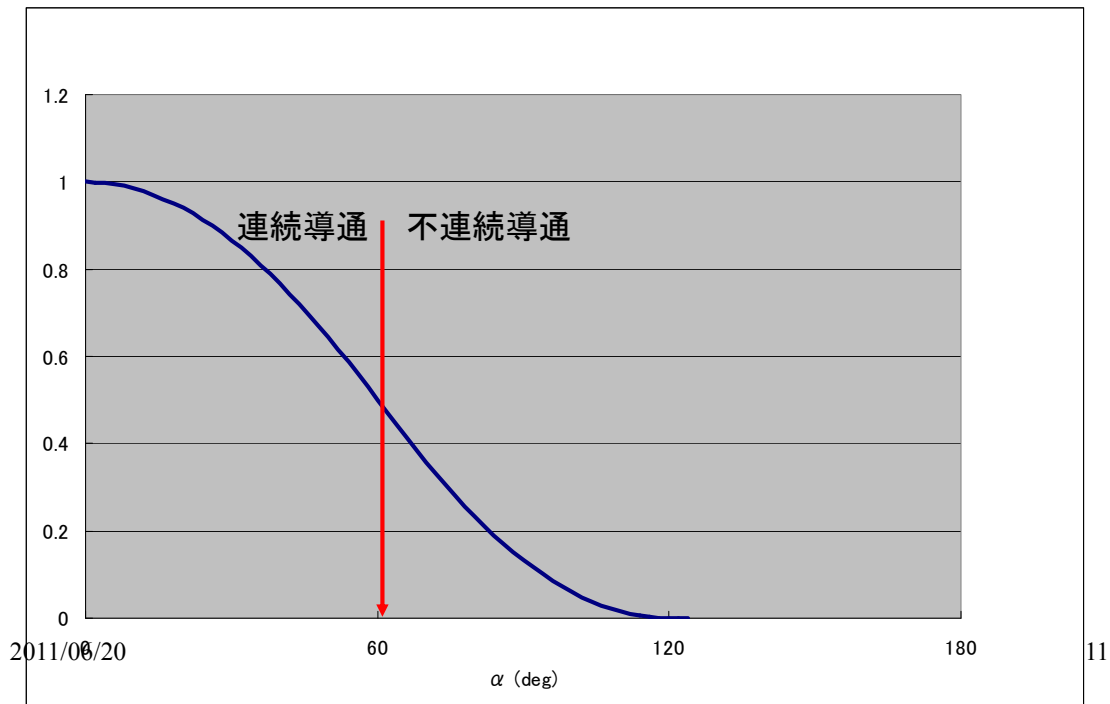
2011/06/20

$60^\circ \leq \alpha$ なので $\cos(\frac{\pi}{3} + \alpha)$ は負 10

位相制御三相全波整流回路

- 抵抗負荷

- 直流平均出力電圧の点弧角特性



位相制御三相全波整流回路

- 誘導性負荷

- 負荷には線間電圧が印加される

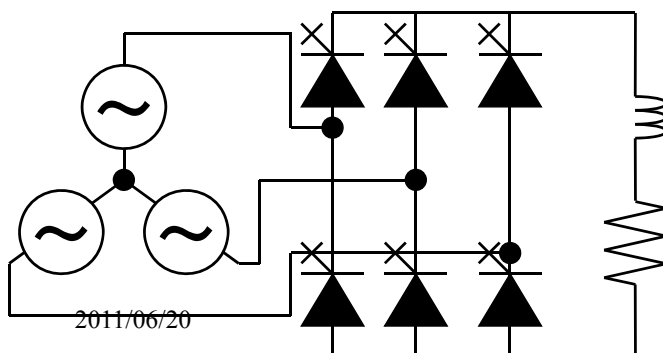
- (直流出力端子には線間電圧が出力される)

相電圧

$$\begin{cases} v_a = V \sin \omega t \\ v_b = V \sin(\omega t - \frac{2}{3}\pi) \\ v_c = V \sin(\omega t + \frac{2}{3}\pi) \end{cases}$$

線間電圧

$$\begin{cases} v_{ab} = \sqrt{3}V \sin(\omega t + \frac{\pi}{6}) \\ v_{bc} = \sqrt{3}V \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) \\ v_{ca} = \sqrt{3}V \sin(\omega t + \frac{5}{6}\pi) \\ v_{ba} = \sqrt{3}V \sin(\omega t - \frac{5}{6}\pi) \\ v_{cb} = \sqrt{3}V \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}) \\ v_{ac} = \sqrt{3}V \sin(\omega t - \frac{\pi}{6}) \end{cases}$$



位相制御三相全波整流回路

・誘導性負荷

– 出力電圧・電流の振る舞い

- ・サイリスタの導通期間中, 出力される三相交流の線間電圧はL,Rが分担

– 負荷電圧

» 導通期間中 $e_d = e_L + e_R = v_{xx}$

» 非導通期間中 $e_d = e_L + e_R = 0$

← いくつかの線間電圧

– Lの印加電圧 $e_L = L \frac{d}{dt} i_d$

– Rの印加電圧 $e_R = R i_d$

– サイリスタの印加電圧

» 導通期間中 $e_{th} = 0$

通電電流が0以下になるまで導通を継続

» 非導通期間中 $e_{th} = \text{線間電圧を分圧したものの}$

2011/06/20

位相制御三相全波整流回路

・誘導性負荷

– 出力電流波形(周期定常状態)を求める

- ・点弧角を α とする(線間電圧の零クロス点を基準)

– 点弧可能な範囲は?

» 抵抗負荷のとき $0 \leq \alpha < 120 \text{ deg}$

- ・サイリスタがオン状態の微分方程式

$$v_{xx} = e_L + e_R = L \frac{d}{dt} i_d + R i_d$$

– オン時点の初期値

» Th1がオンする時点を解析

(1/6周期毎の対称波形)

点弧時点を時間の原点にとる $\omega t = \alpha + \frac{\pi}{6}$

$$v_0 = \sqrt{3}V \sin\left(\alpha + \frac{\pi}{6} + \frac{\pi}{6}\right) = \sqrt{3}V \sin\left(\alpha + \frac{\pi}{3}\right)$$

i_0 連続導通なら $i_0 \neq 0$

2011/06/20

14

位相制御三相全波整流回路

• 誘導性負荷

– 出力電流波形(周期定常状態)を求める

- ラプラス変換(ab相線間電圧がオン)

$$\sqrt{3}V \sin(\omega t + \alpha + \frac{\pi}{3}) = L \frac{d}{dt} i_d + R i_d$$

$$\sqrt{3}V \frac{\omega \cos(\alpha + \frac{\pi}{3}) + s \sin(\alpha + \frac{\pi}{3})}{s^2 + \omega^2} = L s I_d - L i_0 + R I_d$$

$$I_d = \sqrt{3}V \frac{\omega \cos(\alpha + \frac{\pi}{3}) + s \sin(\alpha + \frac{\pi}{3})}{s^2 + \omega^2} \frac{1}{Ls + R} + \frac{L i_0}{Ls + R}$$

$$I_d = \frac{\sqrt{3}V}{R^2 + \omega^2 L^2} \left\{ \frac{[R \cos(\alpha + \frac{\pi}{3}) + \omega L \sin(\alpha + \frac{\pi}{3})] \omega + [R \sin(\alpha + \frac{\pi}{3}) - \omega L \cos(\alpha + \frac{\pi}{3})] s}{s^2 + \omega^2} - \frac{R \sin(\alpha + \frac{\pi}{3}) - \omega L \cos(\alpha + \frac{\pi}{3})}{s + \frac{R}{L}} \right\} + \frac{i_0}{s + \frac{R}{L}}$$

2011/06/20

15

位相制御三相全波整流回路

• 誘導性負荷

– 出力電流波形を求める

- 逆変換

$$i_d(\omega t) = \frac{\sqrt{3}V}{R^2 + \omega^2 L^2} \left\{ [R \cos(\alpha + \frac{\pi}{3}) + \omega L \sin(\alpha + \frac{\pi}{3})] \sin \omega t \right. \\ \left. + [R \sin(\alpha + \frac{\pi}{3}) - \omega L \cos(\alpha + \frac{\pi}{3})] \cos \omega t \right. \\ \left. - [R \sin(\alpha + \frac{\pi}{3}) - \omega L \cos(\alpha + \frac{\pi}{3})] \exp(-\frac{R}{L} t) \right\} + i_0 \exp(-\frac{R}{L} t)$$

- 時間の原点を元に戻して

$$i_d(\omega t) = \frac{V}{R^2 + \omega^2 L^2} \left\{ [R \cos(\alpha + \frac{\pi}{3}) + \omega L \sin(\alpha + \frac{\pi}{3})] \sin(\omega t - \alpha - \frac{\pi}{6}) \right. \\ \left. + [R \sin(\alpha + \frac{\pi}{3}) - \omega L \cos(\alpha + \frac{\pi}{3})] \cos(\omega t - \alpha - \frac{\pi}{6}) \right. \\ \left. - [R \sin(\alpha + \frac{\pi}{3}) - \omega L \cos(\alpha + \frac{\pi}{3})] \exp[-\frac{R}{\omega L} (\omega t - \alpha - \frac{\pi}{6})] \right\} \\ + i_0 \exp[-\frac{R}{\omega L} (\omega t - \alpha - \frac{\pi}{6})]$$

2011/06/20

16

位相制御三相全波整流回路

- 誘導性負荷

- 出力電流波形を求める

- Th1点弧時電流初期値と終端値(Th2の点弧時)

$$\begin{aligned}
 i_d\left(\alpha + \frac{\pi}{3} + \frac{\pi}{6}\right) &= \frac{V}{R^2 + \omega^2 L^2} \left\{ \left[R \cos\left(\alpha + \frac{\pi}{3}\right) + \omega L \sin\left(\alpha + \frac{\pi}{3}\right) \right] \sin\left(\alpha + \frac{\pi}{3} + \frac{\pi}{6} - \alpha - \frac{\pi}{6}\right) \right. \\
 &\quad + \left[R \sin\left(\alpha + \frac{\pi}{3}\right) - \omega L \cos\left(\alpha + \frac{\pi}{3}\right) \right] \cos\left(\alpha + \frac{\pi}{3} + \frac{\pi}{6} - \alpha - \frac{\pi}{6}\right) \\
 &\quad - \left[R \sin\left(\alpha + \frac{\pi}{3}\right) - \omega L \cos\left(\alpha + \frac{\pi}{3}\right) \right] \exp\left[-\frac{R}{\omega L}\left(\alpha + \frac{\pi}{3} + \frac{\pi}{6} - \alpha - \frac{\pi}{6}\right)\right] \left. \right\} \\
 &\quad + i_0 \exp\left[-\frac{R}{\omega L}\left(\alpha + \frac{\pi}{3} + \frac{\pi}{6} - \alpha - \frac{\pi}{6}\right)\right] \\
 &= \frac{V}{R^2 + \omega^2 L^2} \left\{ \left[R \cos\left(\alpha + \frac{\pi}{3}\right) + \omega L \sin\left(\alpha + \frac{\pi}{3}\right) \right] \sin \frac{\pi}{3} \right. \\
 &\quad + \left[R \sin\left(\alpha + \frac{\pi}{3}\right) - \omega L \cos\left(\alpha + \frac{\pi}{3}\right) \right] \cos \frac{\pi}{3} \\
 &\quad - \left[R \sin\left(\alpha + \frac{\pi}{3}\right) - \omega L \cos\left(\alpha + \frac{\pi}{3}\right) \right] \exp\left(-\frac{R}{\omega L} \frac{\pi}{3}\right) \left. \right\} \\
 &\quad + i_0 \exp\left(-\frac{R}{\omega L} \frac{\pi}{3}\right)
 \end{aligned}$$

2011/06/20 $= i_0$

17

位相制御三相全波整流回路

- 誘導性負荷

- 出力電流波形を求める

- Th1点弧時電流初期値と終端値(Th2の点弧時)

$$\begin{aligned}
 i_0 \left[1 - \exp\left(-\frac{R}{\omega L} \frac{\pi}{3}\right) \right] &= \frac{V}{R^2 + \omega^2 L^2} \left\{ \left[R \cos\left(\alpha + \frac{\pi}{3}\right) + \omega L \sin\left(\alpha + \frac{\pi}{3}\right) \right] \sin \frac{\pi}{3} \right. \\
 &\quad + \left[R \sin\left(\alpha + \frac{\pi}{3}\right) - \omega L \cos\left(\alpha + \frac{\pi}{3}\right) \right] \cos \frac{\pi}{3} \\
 &\quad - \left[R \sin\left(\alpha + \frac{\pi}{3}\right) - \omega L \cos\left(\alpha + \frac{\pi}{3}\right) \right] \exp\left(-\frac{R}{\omega L} \frac{\pi}{3}\right) \left. \right\} \\
 &= \frac{V}{R^2 + \omega^2 L^2} \left\{ \left[R \cos\left(\alpha + \frac{\pi}{3}\right) + \omega L \sin\left(\alpha + \frac{\pi}{3}\right) \right] \sin \frac{\pi}{3} \right. \\
 &\quad - \left[R \sin\left(\alpha + \frac{\pi}{3}\right) - \omega L \cos\left(\alpha + \frac{\pi}{3}\right) \right] \cos \frac{\pi}{3} \\
 &\quad + \left[R \sin\left(\alpha + \frac{\pi}{3}\right) - \omega L \cos\left(\alpha + \frac{\pi}{3}\right) \right] \left[1 - \exp\left(-\frac{R}{\omega L} \frac{\pi}{3}\right) \right] \left. \right\} \\
 &= \frac{V}{R^2 + \omega^2 L^2} \left\{ R \left[\cos\left(\alpha + \frac{\pi}{3}\right) \sin \frac{\pi}{3} - \sin\left(\alpha + \frac{\pi}{3}\right) \cos \frac{\pi}{3} \right] \right. \\
 &\quad + \omega L \left[\sin\left(\alpha + \frac{\pi}{3}\right) \sin \frac{\pi}{3} + \cos\left(\alpha + \frac{\pi}{3}\right) \cos \frac{\pi}{3} \right] \\
 &\quad + \left[R \sin\left(\alpha + \frac{\pi}{3}\right) - \omega L \cos\left(\alpha + \frac{\pi}{3}\right) \right] \left[1 - \exp\left(-\frac{R}{\omega L} \frac{\pi}{3}\right) \right] \left. \right\} \quad 18
 \end{aligned}$$

2011/06/20

位相制御三相全波整流回路

- 誘導性負荷

- 出力電流波形を求める

- Th1点弧時電流初期値と終端値(Th2の点弧時)

$$i_0 \left[1 - \exp\left(-\frac{R}{\omega L} \frac{\pi}{3}\right) \right] = \frac{V}{R^2 + \omega^2 L^2} \left\{ -R \sin\left(\alpha + \frac{\pi}{3} - \frac{\pi}{3}\right) + \omega L \cos\left(\alpha + \frac{\pi}{3} - \frac{\pi}{3}\right) \right. \\ \left. + \left[R \sin\left(\alpha + \frac{\pi}{3}\right) - \omega L \cos\left(\alpha + \frac{\pi}{3}\right) \right] \left[1 - \exp\left(-\frac{R}{\omega L} \frac{\pi}{3}\right) \right] \right\} \\ = \frac{V}{R^2 + \omega^2 L^2} \left\{ -R \sin \alpha + \omega L \cos \alpha \right. \\ \left. + \left[R \sin\left(\alpha + \frac{\pi}{3}\right) - \omega L \cos\left(\alpha + \frac{\pi}{3}\right) \right] \left[1 - \exp\left(-\frac{R}{\omega L} \frac{\pi}{3}\right) \right] \right\}$$

$$i_0 = \frac{V}{R^2 + \omega^2 L^2} \left\{ \frac{-R \sin \alpha + \omega L \cos \alpha}{1 - \exp\left(-\frac{R}{\omega L} \frac{\pi}{3}\right)} + R \sin\left(\alpha + \frac{\pi}{3}\right) - \omega L \cos\left(\alpha + \frac{\pi}{3}\right) \right\}$$

連続導通の限界 $i_0 = 0$

$$\frac{-R \sin \alpha + \omega L \cos \alpha}{1 - \exp\left(-\frac{R}{\omega L} \frac{\pi}{3}\right)} + R \sin\left(\alpha + \frac{\pi}{3}\right) - \omega L \cos\left(\alpha + \frac{\pi}{3}\right) = 0$$

2011/06/20

19

位相制御三相全波整流回路

- 誘導性負荷

- 出力電流波形を求める

- 連続導通の限界

$$\frac{-R \sin \alpha + \omega L \cos \alpha}{1 - \exp\left(-\frac{R}{\omega L} \frac{\pi}{3}\right)} + R \left[\sin \alpha \cos \frac{\pi}{3} + \cos \alpha \sin \frac{\pi}{3} \right] - \omega L \left[\cos \alpha \cos \frac{\pi}{3} - \sin \alpha \sin \frac{\pi}{3} \right] = 0$$

$$\frac{-R \sin \alpha + \omega L \cos \alpha}{1 - \exp\left(-\frac{R}{\omega L} \frac{\pi}{3}\right)} + R \left[\frac{1}{2} \sin \alpha + \frac{\sqrt{3}}{2} \cos \alpha \right] - \omega L \left[\frac{1}{2} \cos \alpha - \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \alpha \right] = 0$$

$$\sin \alpha \left\{ -R + \left(\frac{1}{2} R + \frac{\sqrt{3}}{2} \omega L \right) \left[1 - \exp\left(-\frac{R}{\omega L} \frac{\pi}{3}\right) \right] \right\} \\ + \cos \alpha \left\{ \omega L + \left(\frac{\sqrt{3}}{2} R - \frac{1}{2} \omega L \right) \left[1 - \exp\left(-\frac{R}{\omega L} \frac{\pi}{3}\right) \right] \right\} = 0$$

$$\tan \alpha = \frac{\omega L + \left(\frac{\sqrt{3}}{2} R - \frac{1}{2} \omega L \right) \left[1 - \exp\left(-\frac{R}{\omega L} \frac{\pi}{3}\right) \right]}{R - \left(\frac{1}{2} R + \frac{\sqrt{3}}{2} \omega L \right) \left[1 - \exp\left(-\frac{R}{\omega L} \frac{\pi}{3}\right) \right]}$$

2011/06/20

20

位相制御三相全波整流回路

- 誘導性負荷

- 直流出力電圧平均値(連続導通)

$$\begin{aligned}
 E_d &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} e_d d\omega t \\
 &= \frac{1}{2\pi} \left[\int_0^{\frac{\pi}{6}+\alpha} v_{cb} d\omega t + \int_{\frac{\pi}{6}+\alpha}^{\frac{\pi}{2}+\alpha} v_{ab} d\omega t + \int_{\frac{\pi}{2}+\alpha}^{\frac{5\pi}{6}+\alpha} v_{ac} d\omega t \right. \\
 &\quad \left. + \int_{\frac{5\pi}{6}+\alpha}^{\frac{7\pi}{6}+\alpha} v_{bc} d\omega t + \int_{\frac{7\pi}{6}+\alpha}^{\frac{3\pi}{2}+\alpha} v_{ba} d\omega t + \int_{\frac{3\pi}{2}+\alpha}^{\frac{11\pi}{6}+\alpha} v_{ca} d\omega t + \int_{\frac{11\pi}{6}+\alpha}^{2\pi} v_{cb} d\omega t \right] \\
 &= \frac{6}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{6}+\alpha}^{\frac{\pi}{2}+\alpha} \sqrt{3}V \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right) d\omega t \\
 &= \frac{3\sqrt{3}V}{\pi} \left[-\cos\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right) \right]_{\frac{\pi}{6}+\alpha}^{\frac{\pi}{2}+\alpha} \\
 &= \frac{3\sqrt{3}V}{\pi} \left[-\cos\left(\frac{\pi}{2} + \alpha + \frac{\pi}{6}\right) + \cos\left(\frac{\pi}{6} + \alpha + \frac{\pi}{6}\right) \right] \\
 &= \frac{3\sqrt{3}V}{\pi} \cos \alpha
 \end{aligned}$$

2011/06/20

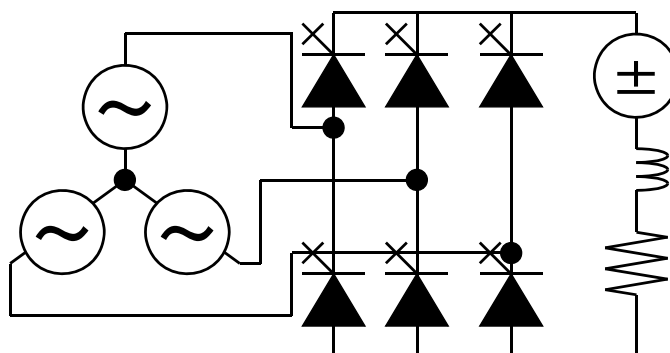
21

位相制御三相全波整流回路

- 誘導負荷(直流電源付)

- 逆変換動作を考える

- 連続導通の条件で, 点弧角を $\frac{\pi}{2} < \alpha < \pi$ とすると, 直流出力端子電圧が負になる $E_d < 0$
 - サイリスタの電流導通方向(符号)は一定なので, 電力の符号が反転 → 逆変換
 - 直流に電源を入れて, 直流電源から交流側に電力を供給することを考える。



2011/06/20

22

位相制御三相全波整流回路

- 誘導負荷(直流電源付)の逆変換動作
 - 微分方程式(正の半波導通状態)

$$v_{xx} = e_L + e_R + v_{dc} = L \frac{d}{dt} i_d + R i_d + v_{dc}$$

- オン時点の初期値

$$v_0 = \sqrt{3}V \sin\left(\alpha + \frac{\pi}{6} + \frac{\pi}{6}\right) \quad i_0 \neq 0$$

- ラプラス変換

$$\sqrt{3}V \sin\left(\omega t + \alpha + \frac{\pi}{3}\right) = L \frac{d}{dt} i_d + R i_d + v_{dc}$$

$$\sqrt{3}V \frac{\omega \cos\left(\alpha + \frac{\pi}{3}\right) + s \sin\left(\alpha + \frac{\pi}{3}\right)}{s^2 + \omega^2} = L s I_d - L i_0 + R I_d + \frac{v_{dc}}{s}$$

$$I_d = \sqrt{3}V \frac{\omega \cos\left(\alpha + \frac{\pi}{3}\right) + s \sin\left(\alpha + \frac{\pi}{3}\right)}{s^2 + \omega^2} \frac{1}{Ls + R} + \frac{L i_0}{Ls + R} - \frac{v_{dc}}{s} \frac{1}{Ls + R}$$

2011/06/20

23

位相制御三相全波整流回路

- 誘導性負荷(直流電源付)の逆変換動作
- 出力電流波形を求める

$$I_d = \frac{\sqrt{3}V}{R^2 + \omega^2 L^2} \left\{ \frac{[R \cos(\alpha + \frac{\pi}{3}) + \omega L \sin(\alpha + \frac{\pi}{3})] \omega + [R \sin(\alpha + \frac{\pi}{3}) - \omega L \cos(\alpha + \frac{\pi}{3})] s}{s^2 + \omega^2} - \frac{R \sin(\alpha + \frac{\pi}{3}) - \omega L \cos(\alpha + \frac{\pi}{3})}{s + \frac{R}{L}} \right\} + \frac{i_0}{s + \frac{R}{L}} - \frac{v_{dc}}{R} \left(\frac{1}{s} - \frac{1}{s + \frac{R}{L}} \right)$$

- 逆変換

$$i_d(\omega t) = \frac{\sqrt{3}V}{R^2 + \omega^2 L^2} \left\{ [R \cos(\alpha + \frac{\pi}{3}) + \omega L \sin(\alpha + \frac{\pi}{3})] \sin \omega t + [R \sin(\alpha + \frac{\pi}{3}) - \omega L \cos(\alpha + \frac{\pi}{3})] \cos \omega t - [R \sin(\alpha + \frac{\pi}{3}) - \omega L \cos(\alpha + \frac{\pi}{3})] \exp\left(-\frac{R}{L} t\right) \right\} + i_0 \exp\left(-\frac{R}{L} t\right) - \frac{v_{dc}}{R} [1 - \exp\left(-\frac{R}{L} t\right)]$$

- 時間の原点を元に戻して

$$i_d(\omega t) = \frac{\sqrt{3}V}{R^2 + \omega^2 L^2} \left\{ [R \cos(\alpha + \frac{\pi}{3}) + \omega L \sin(\alpha + \frac{\pi}{3})] \sin\left(\omega t - \alpha - \frac{\pi}{6}\right) + [R \sin(\alpha + \frac{\pi}{3}) - \omega L \cos(\alpha + \frac{\pi}{3})] \cos\left(\omega t - \alpha - \frac{\pi}{6}\right) - [R \sin(\alpha + \frac{\pi}{3}) - \omega L \cos(\alpha + \frac{\pi}{3})] \exp\left[-\frac{R}{\omega L} (\omega t - \alpha - \frac{\pi}{6})\right] \right\} + i_0 \exp\left[-\frac{R}{\omega L} (\omega t - \alpha - \frac{\pi}{6})\right] - \frac{v_{dc}}{R} \left\{ 1 - \exp\left[-\frac{R}{\omega L} (\omega t - \alpha - \frac{\pi}{6})\right] \right\}$$

2011/06/20

24

位相制御三相全波整流回路

・誘導性負荷(直流電源付)の逆変換動作

・連続導通の時の電流初期値

$$\begin{aligned}
 i_d\left(\alpha + \frac{\pi}{3} + \frac{\pi}{6}\right) &= \frac{\sqrt{3}V}{R^2 + \omega^2 L^2} \left\{ \left[R \cos\left(\alpha + \frac{\pi}{3}\right) + \omega L \sin\left(\alpha + \frac{\pi}{3}\right) \right] \sin\left(\alpha + \frac{\pi}{3} + \frac{\pi}{6} - \alpha - \frac{\pi}{6}\right) \right. \\
 &\quad + \left[R \sin\left(\alpha + \frac{\pi}{3}\right) - \omega L \cos\left(\alpha + \frac{\pi}{3}\right) \right] \cos\left(\alpha + \frac{\pi}{3} + \frac{\pi}{6} - \alpha - \frac{\pi}{6}\right) \\
 &\quad \left. - \left[R \sin\left(\alpha + \frac{\pi}{3}\right) - \omega L \cos\left(\alpha + \frac{\pi}{3}\right) \right] \exp\left[-\frac{R}{\omega L}\left(\alpha + \frac{\pi}{3} + \frac{\pi}{6} - \alpha - \frac{\pi}{6}\right)\right] \right\} \\
 &\quad + i_0 \exp\left[-\frac{R}{\omega L}\left(\alpha + \frac{\pi}{3} + \frac{\pi}{6} - \alpha - \frac{\pi}{6}\right)\right] - \frac{v_{dc}}{R} \left\{ 1 - \exp\left[-\frac{R}{\omega L}\left(\alpha + \frac{\pi}{3} + \frac{\pi}{6} - \alpha - \frac{\pi}{6}\right)\right] \right\} \\
 &= \frac{\sqrt{3}V}{R^2 + \omega^2 L^2} \left\{ \left[R \cos\left(\alpha + \frac{\pi}{3}\right) + \omega L \sin\left(\alpha + \frac{\pi}{3}\right) \right] \sin \frac{\pi}{3} \right. \\
 &\quad + \left[R \sin\left(\alpha + \frac{\pi}{3}\right) - \omega L \cos\left(\alpha + \frac{\pi}{3}\right) \right] \cos \frac{\pi}{3} \\
 &\quad \left. - \left[R \sin\left(\alpha + \frac{\pi}{3}\right) - \omega L \cos\left(\alpha + \frac{\pi}{3}\right) \right] \exp\left(-\frac{R}{\omega L} \frac{\pi}{3}\right) \right\} \\
 &\quad + i_0 \exp\left(-\frac{R}{\omega L} \frac{\pi}{3}\right) - \frac{v_{dc}}{R} \left[1 - \exp\left(-\frac{R}{\omega L} \frac{\pi}{3}\right) \right] \\
 &= i_0
 \end{aligned}$$

2011/06/20

25

位相制御三相全波整流回路

・誘導性負荷(直流電源付)の逆変換動作

・連続導通の時の電流初期値

$$\begin{aligned}
 i_0 \left[1 - \exp\left(-\frac{R}{\omega L} \frac{\pi}{3}\right) \right] &= \frac{\sqrt{3}V}{R^2 + \omega^2 L^2} \left\{ -R \sin\left(\alpha + \frac{\pi}{3} - \frac{\pi}{3}\right) + \omega L \cos\left(\alpha + \frac{\pi}{3} - \frac{\pi}{3}\right) \right. \\
 &\quad \left. + \left[R \sin\left(\alpha + \frac{\pi}{3}\right) - \omega L \cos\left(\alpha + \frac{\pi}{3}\right) \right] \left[1 - \exp\left(-\frac{R}{\omega L} \frac{\pi}{3}\right) \right] \right\} \\
 &\quad - \frac{v_{dc}}{R} \left[1 - \exp\left(-\frac{R}{\omega L} \frac{\pi}{3}\right) \right] \\
 &= \frac{\sqrt{3}V}{R^2 + \omega^2 L^2} \left\{ -R \sin \alpha + \omega L \cos \alpha \right. \\
 &\quad \left. + \left[R \sin\left(\alpha + \frac{\pi}{3}\right) - \omega L \cos\left(\alpha + \frac{\pi}{3}\right) \right] \left[1 - \exp\left(-\frac{R}{\omega L} \frac{\pi}{3}\right) \right] \right\} \\
 &\quad - \frac{v_{dc}}{R} \left[1 - \exp\left(-\frac{R}{\omega L} \frac{\pi}{3}\right) \right]
 \end{aligned}$$

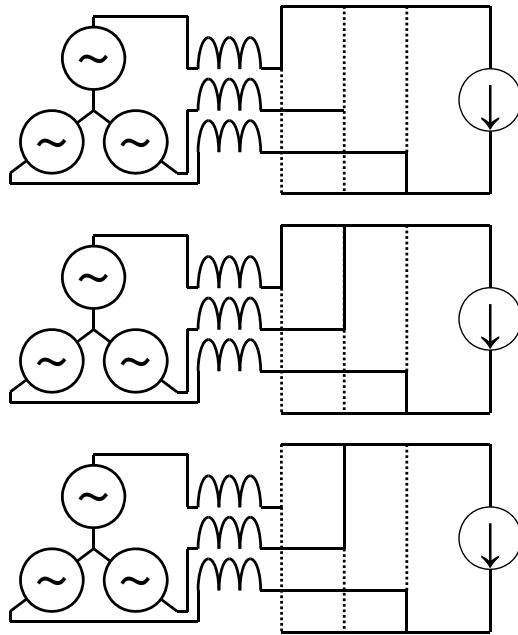
$$\text{よって } i_0 = \frac{\sqrt{3}V}{R^2 + \omega^2 L^2} \left\{ \frac{-R \sin \alpha + \omega L \cos \alpha}{1 - \exp\left(-\frac{R}{\omega L} \frac{\pi}{3}\right)} + R \sin\left(\alpha + \frac{\pi}{3}\right) - \omega L \cos\left(\alpha + \frac{\pi}{3}\right) \right\} - \frac{v_{dc}}{R}$$

Vdcを負にすれば, $\tan \alpha \leq \frac{\omega L + \left(\frac{\sqrt{3}}{2} R - \frac{1}{2} \omega L\right) \left[1 - \exp\left(-\frac{R}{\omega L} \frac{\pi}{3}\right) \right]}{R - \left(\frac{1}{2} R + \frac{\sqrt{3}}{2} \omega L\right) \left[1 - \exp\left(-\frac{R}{\omega L} \frac{\pi}{3}\right) \right]}$ の制約を考えなくてよくなる

2011/06/20

位相制御三相全波整流回路

- 転流重なり角



2011/06/20

27

位相制御三相全波整流回路

- 転流重なり角

- 交流電源の内部インピーダンスを考慮

- 簡略化のための仮定

- 転流期間中直流電流を一定
- 電源インピーダンスとしてリアクタンス成分のみ考える
- 転流期間をu

- 点弧により、交流側三相のうち二相が短絡される

- Th1点弧時にac相が短絡される
- 回路の微分方程式

$$\begin{cases} e_d = v_a - L_{ac} \frac{d}{dt} i_a - v_b + L_{ac} \frac{d}{dt} i_b \\ e_d = v_c - L_{ac} \frac{d}{dt} i_c - v_b + L_{ac} \frac{d}{dt} i_b \end{cases}$$

2011/06/20

28

位相制御三相全波整流回路

- 転流重なり角

- 交流電源の内部インピーダンスを考慮

- 回路の微分方程式

$$i_b = i_{dc} \quad \text{直流電流一定の仮定} \quad \frac{d}{dt} i_b = 0 \quad i_a + i_c = i_{dc}$$

$$\begin{cases} e_d = v_a - L_{ac} \frac{d}{dt} i_a - v_b \\ e_d = v_c - L_{ac} \frac{d}{dt} (i_{dc} - i_a) - v_b = v_c + L_{ac} \frac{d}{dt} i_a - v_b \end{cases}$$

$$v_a - L_{ac} \frac{d}{dt} i_a - v_b = v_c + L_{ac} \frac{d}{dt} i_a - v_b$$

$$2L_{ac} \frac{d}{dt} i_a = v_a - v_c$$

$$\frac{d}{dt} i_a = \frac{1}{2L_{ac}} v_{ac} \quad v_{ac} = \sqrt{3}V \sin(\omega t - \frac{\pi}{6})$$

$$= \frac{\sqrt{3}V}{2L_{ac}} \sin(\omega t - \frac{\pi}{6})$$

$$i_a = i_{a0} - \frac{\sqrt{3}V}{2\omega L_{ac}} \cos(\omega t - \frac{\pi}{6})$$

2011/06/20

29

位相制御三相全波整流回路

- 転流重なり角

- 交流電源の内部インピーダンスを考慮

- 回路の微分方程式

» Th1に点弧信号を与えたときの初期条件

$$i_a(\alpha + \frac{\pi}{6}) = 0 \quad i_c(\alpha + \frac{\pi}{6}) = i_{dc}$$

$$0 = i_{a0} - \frac{\sqrt{3}V}{2\omega L_{ac}} \cos(\alpha + \frac{\pi}{6} - \frac{\pi}{6})$$

$$i_{a0} = \frac{\sqrt{3}V}{2\omega L_{ac}} \cos \alpha$$

» 転流中におけるTh1電流の応答

$$i_a = \frac{\sqrt{3}V}{2\omega L_{ac}} \cos \alpha - \frac{\sqrt{3}V}{2\omega L_{ac}} \cos(\omega t - \frac{\pi}{6})$$

$$= \frac{\sqrt{3}V}{2\omega L_{ac}} [\cos \alpha - \cos(\omega t - \frac{\pi}{6})]$$

2011/06/20

30

位相制御三相全波整流回路

- 転流重なり角

- 交流電源の内部インピーダンスを考慮

- 回路の微分方程式

- » 転流重なり角を u とすると, 転流終了時の条件

$$\begin{aligned} i_a\left(\alpha + \frac{\pi}{6} + u\right) &= \frac{\sqrt{3}V}{2\omega L_{ac}} \left[\cos \alpha - \cos\left(\alpha + \frac{\pi}{6} + u - \frac{\pi}{6}\right) \right] \\ &= \frac{\sqrt{3}V}{2\omega L_{ac}} \left[\cos \alpha - \cos(\alpha + u) \right] \\ &= i_{dc} \end{aligned}$$

$$\cos(\alpha + u) = \cos \alpha - \frac{2\omega L_{ac}}{\sqrt{3}V} i_{dc}$$

- » 転流中において直流側に現れる電圧

$$\begin{aligned} e_d &= v_a - L_{ac} \frac{d}{dt} i_a - v_b \\ &= v_{ab} - L_{ac} \frac{1}{2L_{ac}} v_{ac} \\ &= v_{ab} - \frac{1}{2} v_{ac} \end{aligned}$$

2011/06/20

31

位相制御三相全波整流回路

- 誘導性負荷

- 交流電源の内部インピーダンスによる転流重なり角 u を考慮

$$\begin{aligned} E_d &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} e_d d\omega t = \frac{6}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{6}+\alpha}^{\frac{\pi}{2}+\alpha} e_d d\omega t \\ &= \frac{3}{\pi} \left\{ \int_{\frac{\pi}{6}+\alpha}^{\frac{\pi}{6}+\alpha+u} \left(v_{ab} - \frac{1}{2} v_{ac} \right) d\omega t + \int_{\frac{\pi}{6}+\alpha+u}^{\frac{\pi}{2}+\alpha} v_{ab} d\omega t \right\} \\ &= \frac{3}{\pi} \left\{ \int_{\frac{\pi}{6}+\alpha}^{\frac{\pi}{2}+\alpha} v_{ab} d\omega t - \frac{1}{2} \int_{\frac{\pi}{6}+\alpha}^{\frac{\pi}{6}+\alpha+u} v_{ac} d\omega t \right\} \\ &= \frac{3}{\pi} \left\{ \int_{\frac{\pi}{6}+\alpha}^{\frac{\pi}{2}+\alpha} \sqrt{3}V \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right) d\omega t - \frac{1}{2} \int_{\frac{\pi}{6}+\alpha}^{\frac{\pi}{6}+\alpha+u} \sqrt{3}V \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{6}\right) d\omega t \right\} \\ &= \frac{3\sqrt{3}V}{\pi} \left\{ \int_{\frac{\pi}{6}+\alpha}^{\frac{\pi}{2}+\alpha} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right) d\omega t - \frac{1}{2} \int_{\frac{\pi}{6}+\alpha}^{\frac{\pi}{6}+\alpha+u} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{6}\right) d\omega t \right\} \\ &= \frac{3\sqrt{3}V}{\pi} \left\{ \left[-\cos\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right) \right]_{\frac{\pi}{6}+\alpha}^{\frac{\pi}{2}+\alpha} - \frac{1}{2} \left[-\cos\left(\omega t - \frac{\pi}{6}\right) \right]_{\frac{\pi}{6}+\alpha}^{\frac{\pi}{6}+\alpha+u} \right\} \end{aligned}$$

2011/06/20

32

位相制御三相全波整流回路

• 誘導性負荷

- 交流電源の内部インピーダンスによる転流重なり角 u を考慮

$$\begin{aligned}
 E_d &= \frac{3\sqrt{3}V}{\pi} \left\{ -\cos\left(\frac{\pi}{2} + \alpha + \frac{\pi}{6}\right) + \cos\left(\frac{\pi}{6} + \alpha + \frac{\pi}{6}\right) \right. \\
 &\quad \left. - \frac{1}{2} \left[-\cos\left(\frac{\pi}{6} + \alpha + u - \frac{\pi}{6}\right) + \cos\left(\frac{\pi}{6} + \alpha - \frac{\pi}{6}\right) \right] \right\} \\
 &= \frac{3\sqrt{3}V}{\pi} \left\{ -\cos\left(\alpha + \frac{2}{3}\pi\right) + \cos\left(\alpha + \frac{\pi}{3}\right) - \frac{1}{2} \left[-\cos(\alpha + u) + \cos \alpha \right] \right\} \\
 &= \frac{3\sqrt{3}V}{\pi} \left\{ \cos \alpha - \frac{1}{2} \frac{2\omega L_{ac}}{\sqrt{3}V} i_{dc} \right\} \\
 &= \frac{3\sqrt{3}V}{\pi} \cos \alpha - \frac{3\omega L_{ac}}{\pi} i_{dc}
 \end{aligned}$$

電源インピーダンスにより出力直流電圧は $\frac{3\omega L_{ac}}{\pi} i_{dc}$ 低下する

転流インピーダンス(リアクタンス)降下という

2011/06/20

33

半導体素子と 他励式変換器・自励式変換器

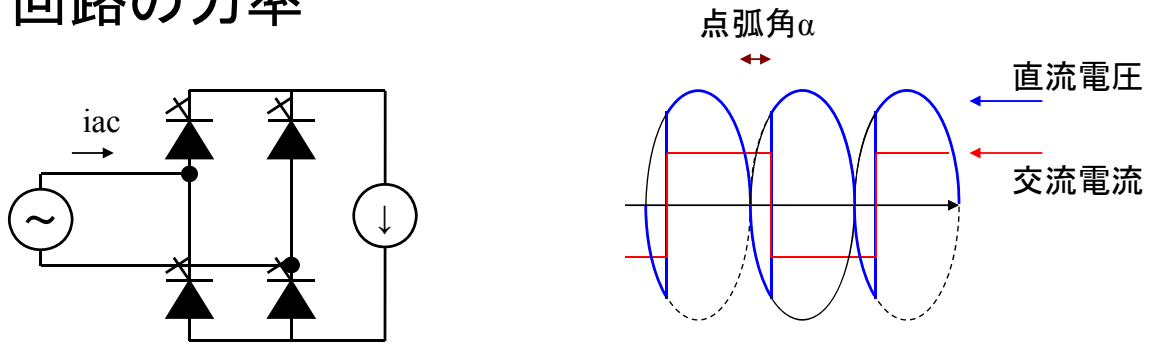
• 半導体素子の特性

- | | | |
|-------------|---|--|
| 他励式
変換器用 | { | - ダイオード → ON, OFFは状態依存(不可制御) |
| | | - サイリスタ → OFF→ONは可制御,
ON→OFFは不可制御
強制転流回路により消弧可能 |
| | | • 光トリガサイリスタ → ゲート回路が簡略化可能 |
| 自励式
変換器用 | { | - GTO(GCT), BJT, FET(MOSFET, JFET), IGBT
→ ON⇔OFF可制御 |
| | | • 電流制御型(GTO, BJT)と電圧制御型(FET, IGBT)がある
- GCTは電流ゲインが低いためゲート回路が大きくなる |

34

サイリスタ位相制御回路

• 回路の力率



- 素子の導通開始点は点弧角 α で決まる
- 転流条件(消弧する素子に逆電圧が印加)を満たすため $\alpha > 0$
 - 電流位相は電圧位相に対して遅れる
 - 遅れ力率角で動作。力率低下による無効電力消費大
 - 逆変換動作時は、転流重なり角, 余裕角確保のため点弧角を大きく出来ない→力率低い

35

半導体素子と 他励式変換器・自励式変換器

- 他励式変換器
 - 転流(消弧)電圧を外部電源に依存する
 - 交流電源が必要(直流ではONしっぱなし)
 - 転流条件が成立する範囲での動作に限定
 - 低力率・遅れ無効電力消費
- 自励式変換器
 - 任意の時点で半導体素子をON,OFF可能
 - パルス幅変調等の高度な制御を適用可能
 - 強制転流回路の適用によっても実現可能
 - 電圧型・電流型

36

電流型変換器

- 交流側から見て直流側が電流源として動作

- 直流電流方向一定(単方向導通素子)
- 直流電圧極性反転可

- 他励動作

- 交流電源電圧で転流
- 交流側インダクタンスによる転流重なり発生

- 自励動作

- ゲート信号で素子のON・OFF動作
- 直流電流源があるため、常に直流電源電流経路が導通している
必要有り→PWM制御では相間短絡モードを利用
- 素子の逆耐圧必要
- ターンオフ時に交流側インダクタンスによるスパイク電圧発生→
スナバコンデンサが必須

