

パワーエレクトロニクス
第十四回 DC-ACインバータ

2022年7月20日

授業の予定

- パワーエレクトロニクス緒論
- パワーエレクトロニクスにおける基礎理論
- パワー半導体デバイス
- 整流回路
- 整流回路の交流側特性と他励式インバータ
- 交流電力制御とサイクロコンバータ
- 直流チョッパ
- DC-DCコンバータと共振形コンバータ
- 自励式インバータ
- 演習

PWM制御

- 出力電流のTHDを低減する
- 出力基本波より高い周波数でスイッチング
 - 出力電圧を制御
 - 出力電圧のTHDは増加する
 - 高調波成分はフィルタで除去容易
 - 欠点
 - 制御の複雑化
 - スwitchング損失増加
 - 三角波比較方式
 - 信号波(変調波)と搬送波(三角波)を比較してパルス生成

PWM制御

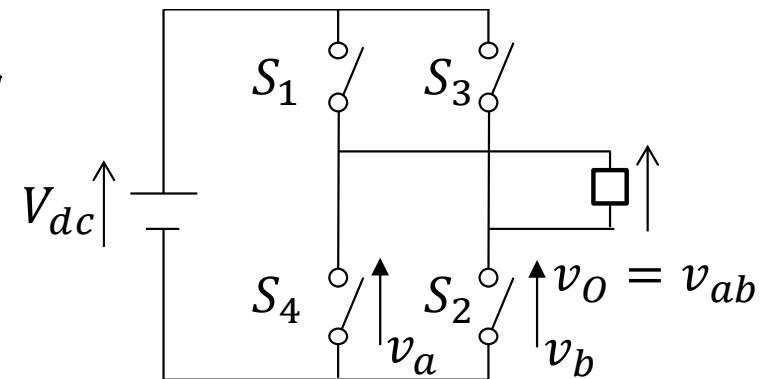
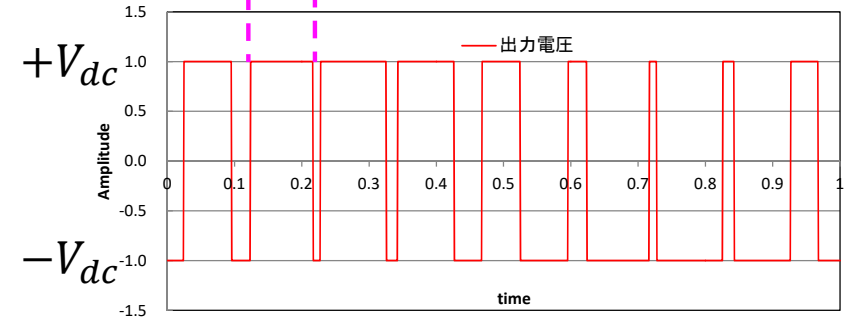
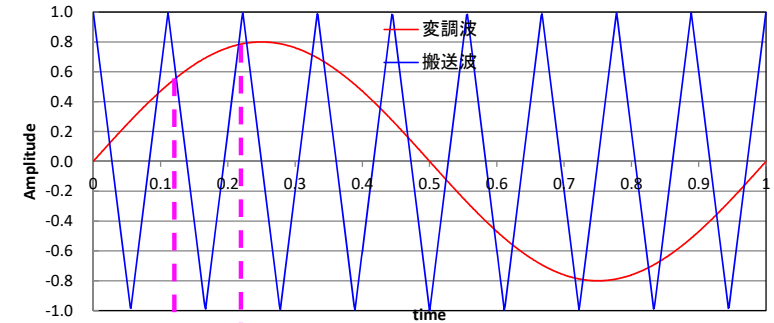
- バイポーラ変調

- 変調波 → 正弦波: v_{sin}
- 搬送波 → 三角波: v_{tri}
- 出力電圧

$$v_o = \begin{cases} +V_{dc} & (v_{sin} \geq v_{tri}) \\ -V_{dc} & (v_{sin} < v_{tri}) \end{cases}$$

- $\pm V_{dc}$ を出力するのでバイポーラ
- スイッチの状態

$$\begin{cases} ON: S_1, S_2 \rightarrow v_o = +V_{dc} \\ ON: S_3, S_4 \rightarrow v_o = -V_{dc} \end{cases}$$



PWM制御

- ユニポーラ変調1

- 出力電圧 $+V_{dc}, 0$ または $-V_{dc}, 0$ の間で変化

- スイッチの状態

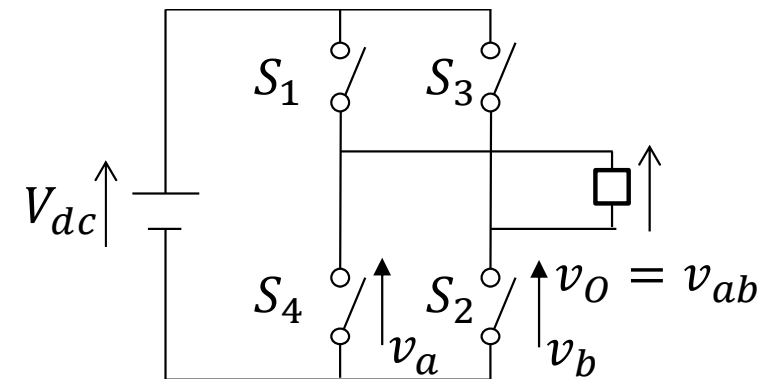
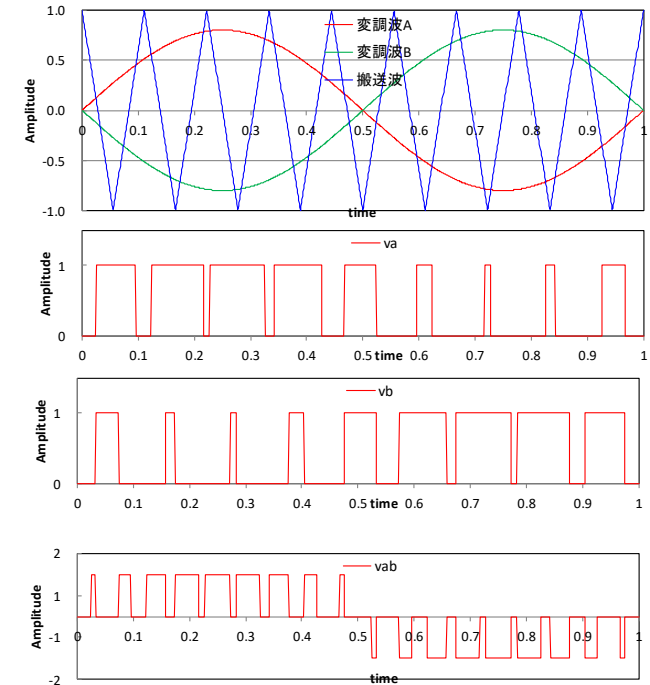
- S_1, S_4 および S_2, S_3 を相補動作させる

- S_1 オン $v_{sin} > v_{tri}$

- S_2 オン $-v_{sin} < v_{tri}$

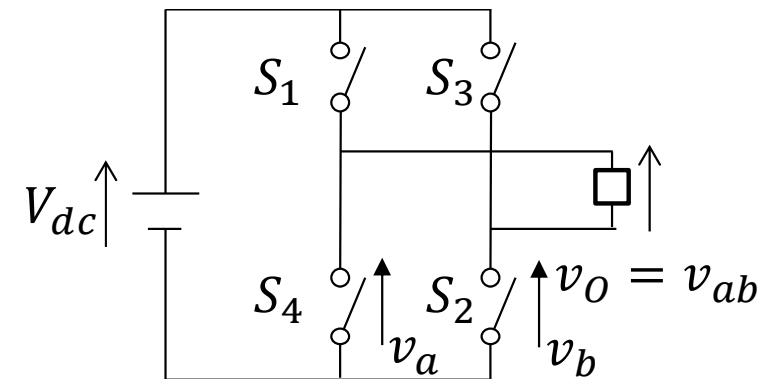
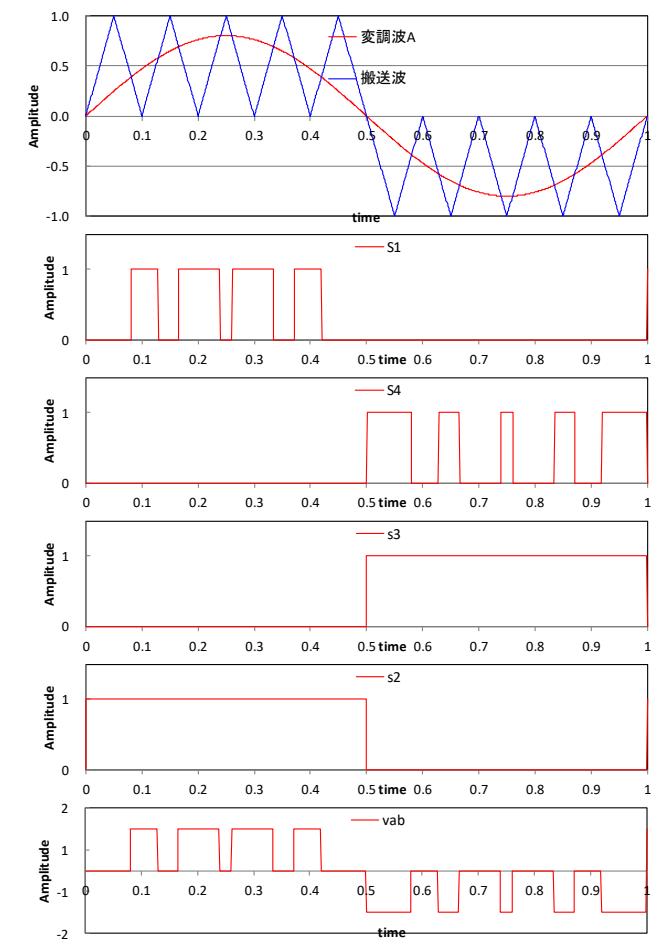
- S_3 オン $-v_{sin} > v_{tri}$

- S_4 オン $v_{sin} < v_{tri}$



PWM制御

- ユニポーラ変調2
 - 一方のアームをスイッチング周波数で動作
 - 他方のアームを基本波周波数で動作
 - スwitchの状態
 - スwitching周波数動作
 - S_1 オン $v_{sin} > v_{tri}$
 - S_4 オン $v_{sin} < v_{tri}$
 - 基本は周波数動作
 - S_2 オン $v_{sin} > 0$
 - S_3 オン $v_{sin} < 0$



PWM制御

- 周波数変調比: $m_f = \frac{f_{carrier}}{f_{reference}} = \frac{f_{tri}}{f_{sin}}$
 - 搬送波と信号波の周波数の比
 - 比が大きいと高調波成分は高周波となる
- 振幅変調比: $m_a = \frac{V_{m,reference}}{V_{m,carrier}} = \frac{V_{m,sin}}{V_{m,tri}}$
 - 搬送波と信号波の振幅の比
 - $0 \leq m_a \leq 1$ では基本波振幅は m_a に比例する
 - $V_1 = m_a V_{dc}$
 - $1 < m_a$ では線形とならない(比例しない)

PWMによる出力電圧制御

- 同期PWM

- 発生しようとする交流電圧に同期したパルスを発生
 - スwitchングの周波数は、基本波の整数倍
 - 基本波の整数倍の理論高調波が発生
 - 高調波除去フィルタの設計が容易
 - 比較的低いスitchング周波数で用いる

- 非同期PWM

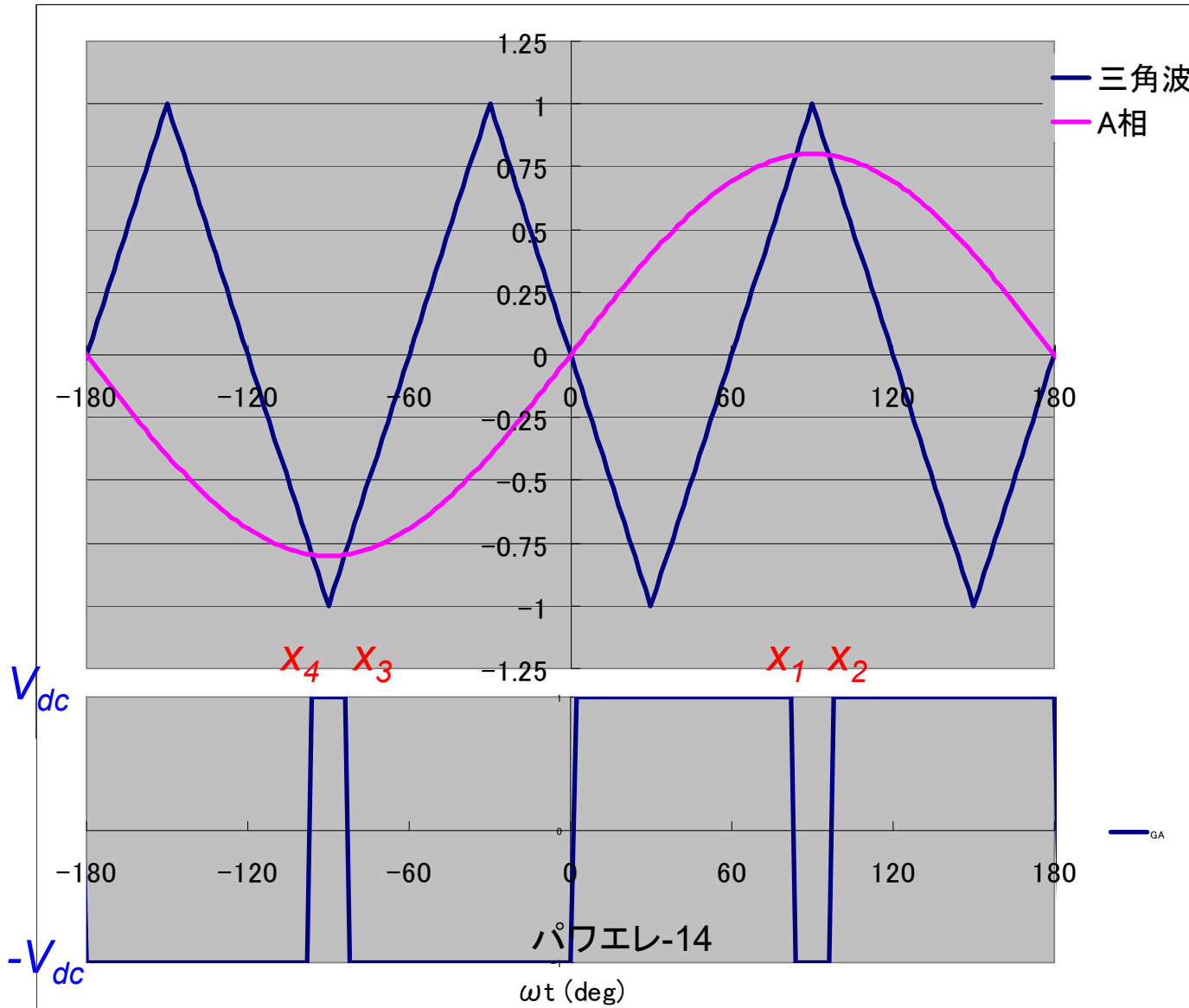
- 発生しようとする交流電圧の位相・周波数に同期しないゲート信号を生成
 - スitchングの周波数は、基本波の整数倍である必要がない
 - 発生する理論高調波が基本波の整数倍とは限らない
 - 比較的高いスitchング周波数で用いる
 - 低いスitchング周波数ではビートが発生

PWMによる出力電圧制御

- 三角波比較によるPWMパルスの生成
 - 三角波と信号波(正弦波)との大小関係でパルスのオン・オフを決定
 - 三角波は ± 1
 - 信号波は振幅1以下
 - 3パルス同期PWM
 - 区間① $-\pi \sim -5/6\pi$ $y=6/\pi x+6$
 - 区間② $-5/6\pi \sim -\pi/2$ $y=-6/\pi x+4$
 - 区間③ $-\pi/2 \sim -\pi/6$ $y=6/\pi x+2$
 - 区間④ $-\pi/6 \sim \pi/6$ $y=-6/\pi x$
 - 区間⑤ $\pi/6 \sim \pi/2$ $y=6/\pi x-2$
 - 区間⑥ $\pi/2 \sim 5/6\pi$ $y=-6/\pi x+4$
 - 区間⑦ $5/6\pi \sim \pi$ $y=6/\pi x-6$

PWMによる出力電圧制御

- 三角波比較によるPWMパルスの生成
 - 3パルス同期PWM



波形の対称性

$$X_1 = -X_3$$

$$X_2 = -X_4$$

$$X_2 = \pi - X_1$$

PWMによる出力電圧制御

- 三角波比較によるPWMパルスの生成
 - 3パルス同期PWM

- フーリエ級数展開 $f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \{a_n \cos nx + b_n \sin nx\}$

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \cos nx dx \quad \text{ただし } a_0 = 0$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{1}{n\pi} \left\{ \begin{aligned} &[-V_{dc} \sin nx]_{-\pi}^{x_4} + [V_{dc} \sin nx]_{x_4}^{x_3} + [-V_{dc} \sin nx]_{x_3}^0 \\ &+ [V_{dc} \sin nx]_0^{x_1} + [-V_{dc} \sin nx]_{x_1}^{x_2} + [V_{dc} \sin nx]_{x_2}^{\pi} \end{aligned} \right\} \\
 &= \frac{V_{dc}}{n\pi} \left\{ \begin{aligned} &-\sin nx_4 + \sin(-n\pi) + \sin nx_3 - \sin nx_4 - \sin n0 + \sin nx_3 \\ &+ \sin nx_1 - \sin 0 - \sin nx_2 + \sin nx_1 + \sin n\pi - \sin nx_2 \end{aligned} \right\} \\
 &= \frac{V_{dc}}{n\pi} \left\{ \begin{aligned} &\sin nx_2 + 0 - \sin nx_1 + \sin nx_2 - 0 - \sin nx_1 \\ &+ \sin nx_1 - 0 - \sin nx_2 + \sin nx_1 + 0 - \sin nx_2 \end{aligned} \right\} = 0
 \end{aligned}$$

PWMによる出力電圧制御

- 三角波比較によるPWMパルスの生成
 - 3パルス同期PWM
 - フーリエ級数展開

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \sin nx dx$$

$$\begin{aligned} &= \frac{1}{n\pi} \left\{ \begin{aligned} & \left[V_{dc} \cos nx \right]_{-\pi}^{x_4} + \left[-V_{dc} \cos nx \right]_{x_4}^{x_3} + \left[V_{dc} \cos nx \right]_{x_3}^0 \\ & + \left[-V_{dc} \cos nx \right]_0^{x_1} + \left[V_{dc} \cos nx \right]_{x_1}^{x_2} + \left[-V_{dc} \cos nx \right]_{x_2}^{\pi} \end{aligned} \right\} \\ &= \frac{V_{dc}}{n\pi} \left\{ \begin{aligned} & \cos nx_4 - \cos(-n\pi) - \cos nx_3 + \cos nx_4 + \cos n0 - \cos nx_3 \\ & - \cos nx_1 + \cos 0 + \cos nx_2 - \cos nx_1 - \cos n\pi + \cos nx_2 \end{aligned} \right\} \\ &= \frac{V_{dc}}{n\pi} \left\{ \begin{aligned} & \cos nx_2 - (-1)^n - \cos nx_1 + \cos nx_2 + 1 - \cos nx_1 \\ & - \cos nx_1 + 1 + \cos nx_2 - \cos nx_1 - (-1)^n + \cos nx_2 \end{aligned} \right\} \\ &= \frac{2V_{dc}}{n\pi} \left\{ 2 \cos nx_2 - (-1)^n - 2 \cos nx_1 + 1 \right\} \end{aligned}$$

PWMによる出力電圧制御

- 三角波比較によるPWMパルスの生成
 - 3パルス同期PWM
 - フーリエ級数展開

$$\begin{aligned} b_n &= \frac{2V_{dc}}{n\pi} \left\{ 2 \cos nx_2 - (-1)^n - 2 \cos nx_1 + 1 \right\} \\ &= \frac{2V_{dc}}{n\pi} \left\{ 2 \cos n(\pi - x_1) - (-1)^n - 2 \cos nx_1 + 1 \right\} \\ &= \frac{2V_{dc}}{n\pi} \left\{ 2(\cos n\pi \cos nx_1 + \sin n\pi \sin nx_1) - (-1)^n - 2 \cos nx_1 + 1 \right\} \\ &= \frac{2V_{dc}}{n\pi} \left\{ 2[(-1)^n \cos nx_1 + 0 \sin nx_1] - (-1)^n - 2 \cos nx_1 + 1 \right\} \\ &= \frac{2V_{dc}}{n\pi} \left\{ 2(-1)^n \cos nx_1 - (-1)^n - 2 \cos nx_1 + 1 \right\} \\ &= \frac{2V_{dc}}{n\pi} \left\{ (-1)^n (2 \cos nx_1 - 1) - 2 \cos nx_1 + 1 \right\} \\ &= \frac{2V_{dc}}{n\pi} \left[(-1)^n - 1 \right] (2 \cos nx_1 - 1) \end{aligned}$$

PWMによる出力電圧制御

- 三角波比較によるPWMパルスの生成
 - 3パルス同期PWM
 - フーリエ級数展開

$$f(x) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2V_{dc}}{n\pi} \left[(-1)^n - 1 \right] (2 \cos nx_1 - 1) \sin nx$$

ただし、正弦波の振幅をAとすると

- 基本波の振幅

$$A \sin x_1 = \frac{6}{\pi} x_1 - 2$$

$$b_1 = \frac{2V_{dc}}{\pi} \left[(-1)^1 - 1 \right] (2 \cos x_1 - 1) = \frac{4V_{dc}}{\pi} (1 - 2 \cos x_1)$$

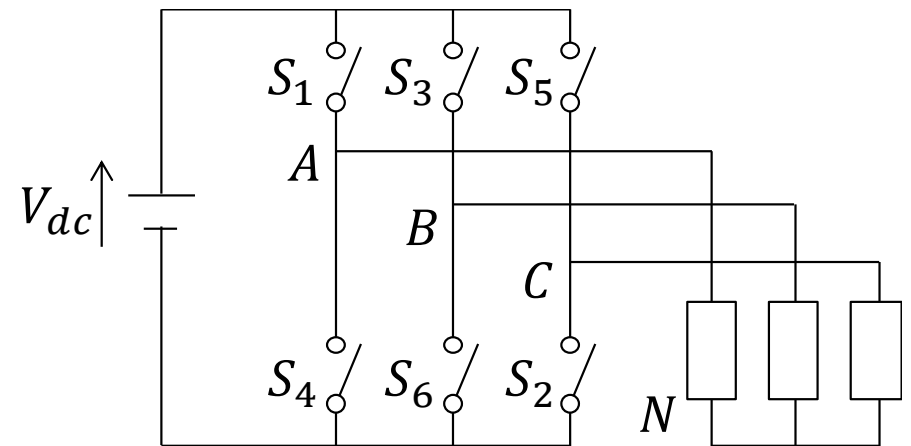
$$\frac{\pi}{4V_{dc}} b_1 = 1 - 2 \cos x_1$$

$$x_1 = \cos^{-1} \frac{2 - \pi b_1}{8V_{dc}}$$

$$\Rightarrow A = \frac{\frac{6}{\pi} x_1 - 2}{\sin x_1} = \frac{\frac{6}{\pi} \cos^{-1} \frac{2 - \pi b_1}{8V_{dc}} - 2}{\sqrt{1 - \left(\frac{2 - \pi b_1}{8V_{dc}} \right)^2}} \Rightarrow b_1 \cong \frac{4V_{dc}}{\pi} A$$

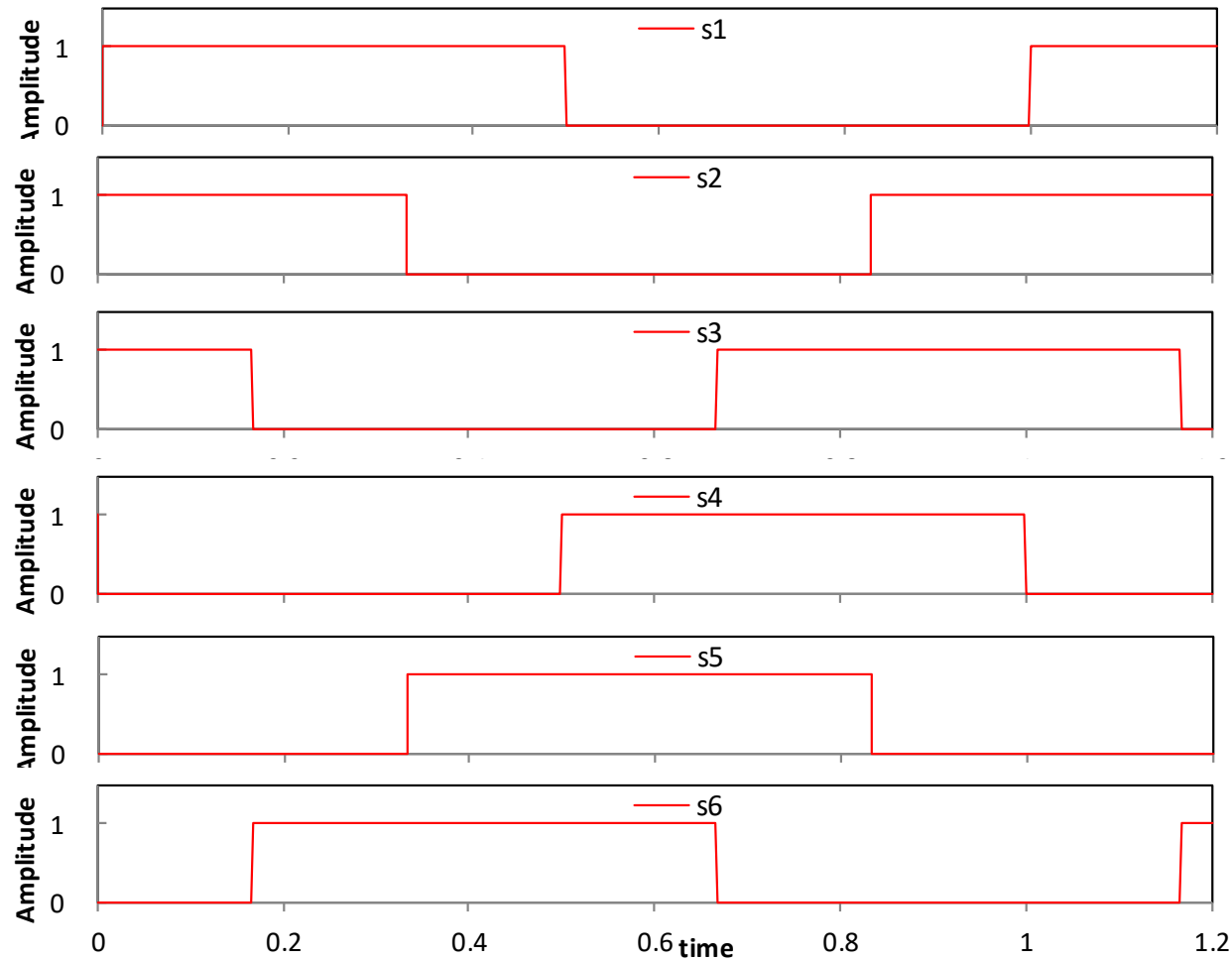
三相インバータ

- モータ駆動・大容量PV用パワコン等
- 1パルス駆動
 - 各スイッチの通流率0.5
 - 導通角 180°
 - $\frac{T}{6}$, 60° 毎にスイッチング
 - 上下短絡防止
 - (S_1, S_4) (S_2, S_5) (S_3, S_6)



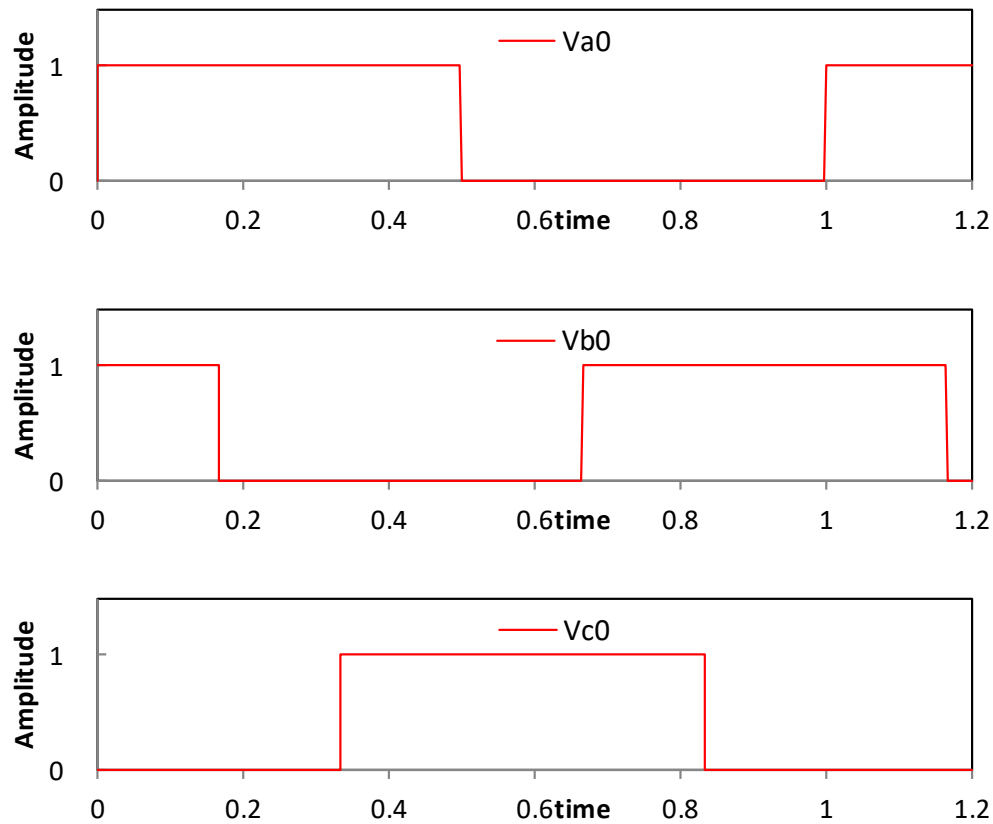
三相インバータ

- スイッチ動作パターン

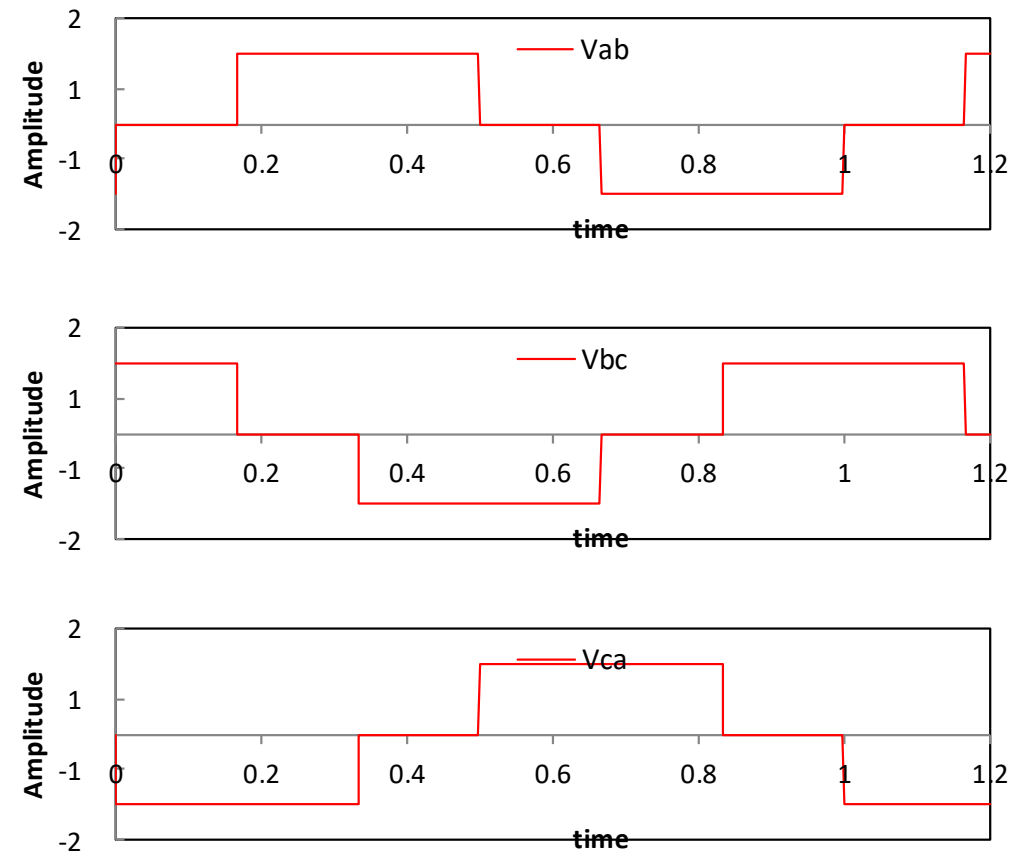


三相インバータ

- 相出力電圧

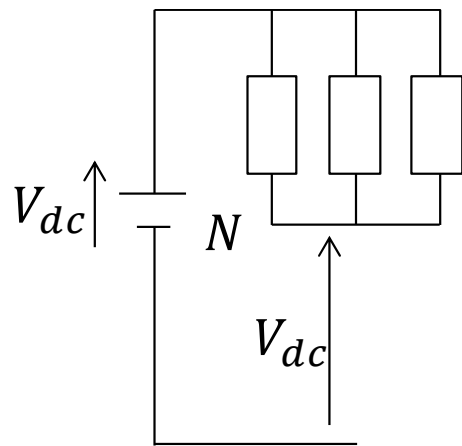


- 線間電圧

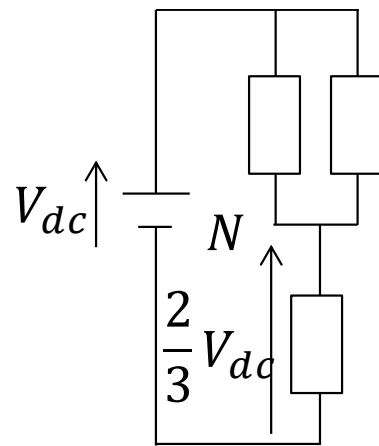


三相インバータ

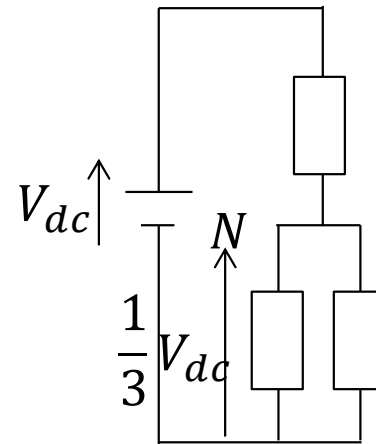
- Y結線中性点 N 電位 V_{N0}



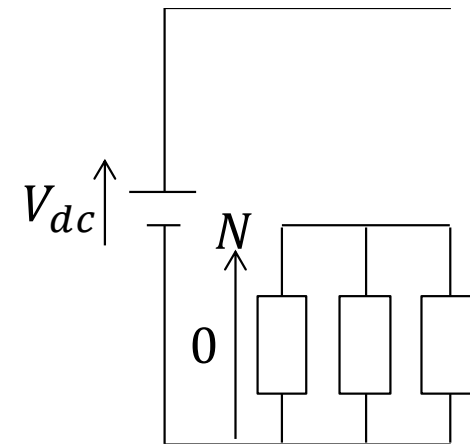
上オン3個
下オン0個
 $V_{N0} = V_{dc}$



上オン2個
下オン1個
 $V_{N0} = \frac{2}{3}V_{dc}$



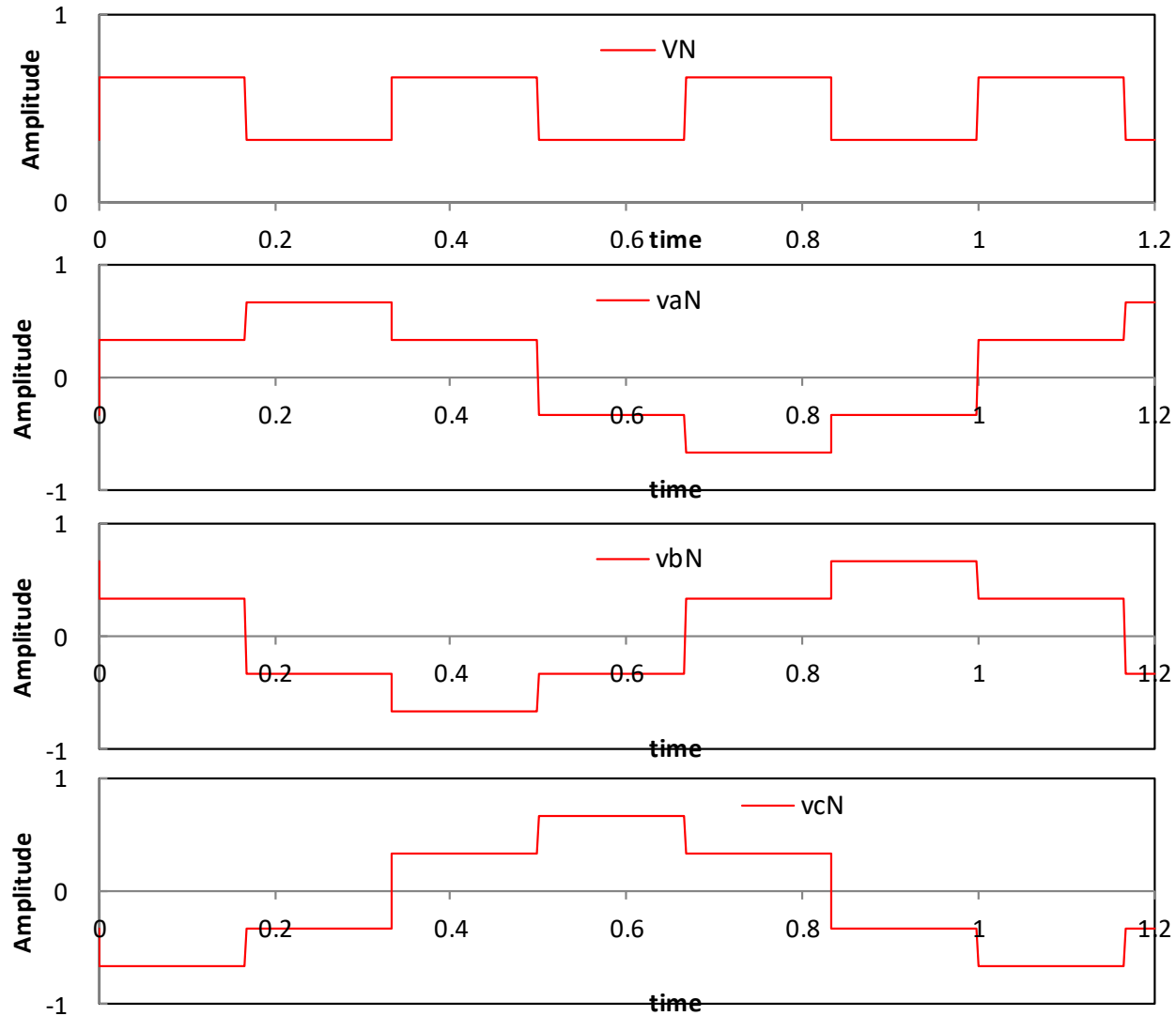
上オン1個
下オン2個
 $V_{N0} = \frac{1}{3}V_{dc}$



上オン0個
下オン3個
 $V_{N0} = 0$

三相インバータ

- 中性点電位と相電圧



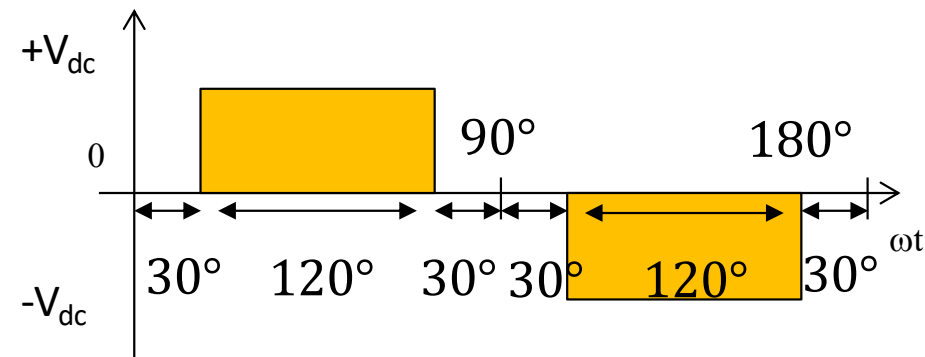
三相インバータ

- 線間電圧 V_{LL} の周波数スペクトル

- $$v_{LL}(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t)$$

- $$a_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} v_{LL}(t) \cos n\omega t d\omega t$$

- $$b_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} v_{LL}(t) \sin n\omega t d\omega t$$



三相インバータ

- 線間電圧 V_{LL} の周波数スペクトル

$$\begin{aligned} \bullet a_n &= \frac{1}{\pi} \left\{ \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{5\pi}{6}} V_{dc} \cos n\omega t d\omega t + \right. \\ &\quad \left. \int_{\frac{7\pi}{6}}^{\frac{11\pi}{6}} -V_{dc} \cos n\omega t d\omega t \right\} \\ &= \frac{V_{dc}}{\pi} \left\{ \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{5\pi}{6}} \cos n\omega t d\omega t - \int_{\frac{7\pi}{6}}^{\frac{11\pi}{6}} \cos n\omega t d\omega t \right\} \end{aligned}$$

三相インバータ

- 線間電圧 V_{LL} の周波数スペクトル

$$\begin{aligned} \bullet a_n &= \frac{V_{dc}}{n\pi} \left[\sin n\omega t \right]_{\frac{5\pi}{6}}^{\frac{7\pi}{6}} - \left[\sin n\omega t \right]_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{11\pi}{6}} \\ &= \frac{V_{dc}}{n\pi} \left\{ \sin \frac{5n\pi}{6} - \sin \frac{7n\pi}{6} + \sin \frac{\pi n}{6} - \sin \frac{11n\pi}{6} \right\} \\ &= \frac{V_{dc}}{n\pi} \left\{ \sin \frac{5n\pi}{6} - \sin \frac{7n\pi}{6} - \sin \frac{5n\pi}{6} + \sin \frac{n\pi}{6} \right\} \\ &= 0 \end{aligned}$$

三相インバータ

- 線間電圧 V_{LL} の周波数スペクトル

$$\begin{aligned} \bullet \quad b_n &= \frac{1}{\pi} \left\{ \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{5\pi}{6}} V_{dc} \sin n\omega t \, d\omega t + \right. \\ &\quad \left. \int_{\frac{7\pi}{6}}^{\frac{11\pi}{6}} -V_{dc} \sin n\omega t \, d\omega t \right\} \\ &= \frac{V_{dc}}{\pi} \left\{ \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{5\pi}{6}} \sin n\omega t \, d\omega t - \int_{\frac{7\pi}{6}}^{\frac{11\pi}{6}} \sin n\omega t \, d\omega t \right\} \end{aligned}$$

三相インバータ

- 線間電圧 V_{LL} の周波数スペクトル

$$\begin{aligned}
 \bullet \quad b_n &= \frac{V_{dc}}{n\pi} \left[-\cos n\omega t \right]_{\frac{5\pi}{6}}^{\frac{7\pi}{6}} \frac{\pi}{6} \frac{11\pi}{6} \\
 &= \frac{V_{dc}}{n\pi} \left\{ -\cos \frac{5n\pi}{6} + \cos \frac{n\pi}{6} - \cos \frac{7n\pi}{6} + \cos \frac{11n\pi}{6} \right\} \\
 &= \frac{V_{dc}}{n\pi} \left\{ -\cos \frac{5n\pi}{6} + \cos \frac{n\pi}{6} - \cos \frac{5n\pi}{6} + \cos \frac{n\pi}{6} \right\} \\
 &= \frac{2V_{dc}}{n\pi} \left\{ \cos \frac{n\pi}{6} - \cos \frac{5n\pi}{6} \right\}
 \end{aligned}$$

三相インバータ

- 線間電圧 V_{LL} の周波数スペクトル

- $b_n = \frac{2V_{dc}}{n\pi} \{1 - (-1)^n\} \cos \frac{n\pi}{6}$

- $n = 2k$ (偶数次)

- $b_n = 0$

- $n = 2k + 1$ (奇数次)

- $b_n = \frac{4V_{dc}}{n\pi} \cos \frac{n\pi}{6}$

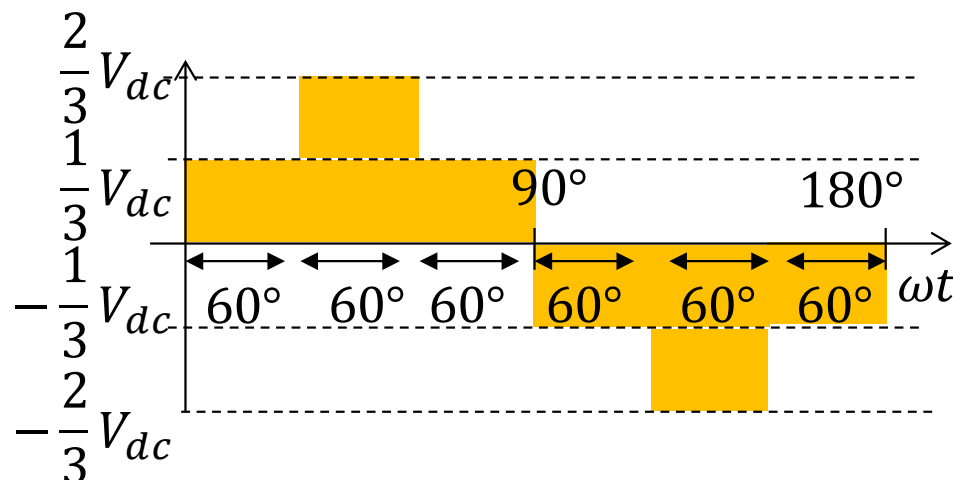
三相インバータ

- 相電圧 V_{aN} の周波数スペクトル

- $$v_{LL}(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t)$$

- $$a_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} v_{LL}(t) \cos n\omega t d\omega t$$

- $$b_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} v_{LL}(t) \sin n\omega t d\omega t$$



三相インバータ

- 相電圧 V_{aN} の周波数スペクトル

$$\begin{aligned}
 \bullet \quad a_n &= \frac{V_{dc}}{3\pi} \left\{ \int_0^{\frac{\pi}{3}} \cos n\omega t \, d\omega t + \int_{\frac{\pi}{3}}^{\frac{2\pi}{3}} 2 \cos n\omega t \, d\omega t + \right. \\
 &\quad \int_{\frac{2\pi}{3}}^{\pi} \cos n\omega t \, d\omega t + \int_{\pi}^{\frac{4\pi}{3}} -\cos n\omega t \, d\omega t + \\
 &\quad \left. \int_{\frac{4\pi}{3}}^{\frac{5\pi}{3}} -2 \cos n\omega t \, d\omega t + \int_{\frac{5\pi}{3}}^{2\pi} -\cos n\omega t \, d\omega t \right\} \\
 &= \frac{V_{dc}}{3\pi} \left\{ \int_0^{\frac{\pi}{3}} \cos n\omega t \, d\omega t + 2 \int_{\frac{\pi}{3}}^{\frac{4\pi}{3}} \cos n\omega t \, d\omega t \right\}
 \end{aligned}$$

三相インバータ

- 相電圧 V_{aN} の周波数スペクトル

$$\bullet a_n = \frac{V_{dc}}{3n\pi} \left\{ [\sin n\omega t]_{0}^{\frac{\pi}{3}} \frac{\pi}{3} \frac{\pi}{3} \frac{5\pi}{3} + 2[\sin n\omega t]_{\frac{\pi}{3}}^{\frac{2\pi}{3}} \frac{4\pi}{3} \right\}$$

$$\bullet \sin \frac{2n\pi}{3} = -(-1)^n \sin \frac{n\pi}{3}$$

$$\bullet \sin \frac{4n\pi}{3} = (-1)^n \sin \frac{n\pi}{3}$$

$$\bullet \sin \frac{5n\pi}{3} = -\sin \frac{n\pi}{3}$$

三相インバータ

- 相電圧 V_{aN} の周波数スペクトル

- $$a_n = \frac{V_{dc}}{3n\pi} \left\{ \sin \frac{n\pi}{3} + (-1)^n \sin \frac{n\pi}{3} - (-1)^n \sin \frac{n\pi}{3} - \sin \frac{n\pi}{3} - 2(-1)^n \sin \frac{n\pi}{3} - 2 \sin \frac{n\pi}{3} + 2(-1)^n \sin \frac{n\pi}{3} + 2 \sin \frac{n\pi}{3} \right\} = 0$$

三相インバータ

- 相電圧 V_{aN} の周波数スペクトル

$$\begin{aligned}
 \bullet \quad b_n &= \frac{V_{dc}}{3\pi} \left\{ \int_0^{\frac{\pi}{3}} \sin n\omega t \, d\omega t + \int_{\frac{\pi}{3}}^{\frac{2\pi}{3}} 2 \sin n\omega t \, d\omega t + \right. \\
 &\quad \left. \int_{\frac{2\pi}{3}}^{\pi} \sin n\omega t \, d\omega t + \int_{\pi}^{\frac{4\pi}{3}} -\sin n\omega t \, d\omega t + \right. \\
 &\quad \left. \int_{\frac{4\pi}{3}}^{\frac{5\pi}{3}} -2 \sin n\omega t \, d\omega t + \int_{\frac{5\pi}{3}}^{2\pi} -\sin n\omega t \, d\omega t \right\} \\
 &= \frac{V_{dc}}{3\pi} \left\{ \int_0^{\frac{\pi}{3}} \sin n\omega t \, d\omega t + 2 \int_{\frac{\pi}{3}}^{\frac{4\pi}{3}} \sin n\omega t \, d\omega t \right\}
 \end{aligned}$$

三相インバータ

- 相電圧 V_{aN} の周波数スペクトル

$$\bullet b_n = \frac{-V_{dc}}{3n\pi} \left\{ [\cos n\omega t]_{0}^{\frac{\pi}{3}} \frac{\pi}{3} \frac{\pi}{3} \frac{5\pi}{3} + 2[\cos n\omega t]_{\frac{\pi}{3}}^{\frac{2\pi}{3}} \frac{4\pi}{3} \frac{2\pi}{3} \frac{4\pi}{3} \right\}$$

$$\bullet \cos \frac{2n\pi}{3} = (-1)^n \cos \frac{n\pi}{3}$$

$$\bullet \cos \frac{4n\pi}{3} = (-1)^n \cos \frac{n\pi}{3}$$

$$\bullet \cos \frac{5n\pi}{3} = \cos \frac{n\pi}{3}$$

三相インバータ

- 相電圧 V_{aN} の周波数スペクトル

- $$b_n = \frac{-V_{dc}}{3n\pi} \left\{ \cos \frac{n\pi}{3} - 1 + (-1)^n - (-1)^n \cos \frac{n\pi}{3} + \right.$$
$$\left. (-1)^n - (-1)^n \cos \frac{n\pi}{3} + \cos \frac{n\pi}{3} - 1 + 2(-1)^n \cos \frac{n\pi}{3} - \right.$$
$$\left. 2 \cos \frac{n\pi}{3} + 2(-1)^n \cos \frac{n\pi}{3} - 2 \cos \frac{n\pi}{3} \right\}$$
$$= \frac{2V_{dc}}{3n\pi} \{1 - (-1)^n\} \left\{1 + \cos \frac{n\pi}{3}\right\}$$

- $n = 2k$ (偶数次) $n = 3k$ (3の倍数)

- $b_n = 0$

- $n = 6k \pm 1$

- $b_n \neq 0$

三相PWMインバータ

- 単相と同様にPWMによって高調波低減可能
- スイッチ動作
 - S_1 オン $v_a > v_{tri}$
 - S_2 オン $v_c > v_{tri}$
 - S_3 オン $v_b > v_{tri}$
 - S_4 オン $v_a < v_{tri}$
 - S_5 オン $v_c < v_{tri}$
 - S_6 オン $v_b < v_{tri}$
- 同期PWMでは3の奇数倍の搬送波を利用

