パワーエレクトロニクス
第13回　DC-ACインバータ

2026年7月15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
    - スイッチング損失増加
  - 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

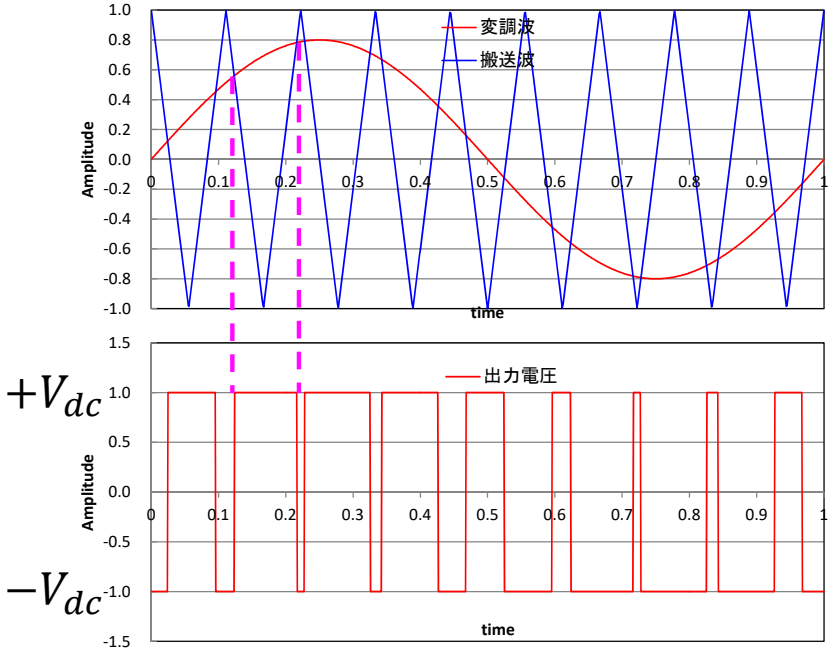
PWM制御

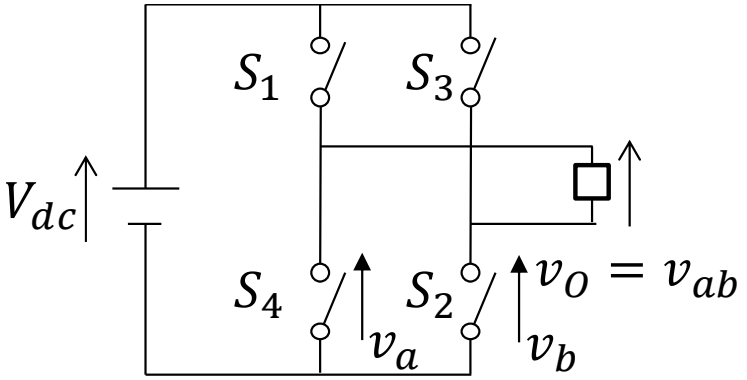
- バイポーラ変調
  - 変調波→正弦波:v_{sin}
  - 搬送波→三角波:v_{tri}
  - 出力電圧

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

  - $\pm V_{dc}$を出力するのでバイポーラ
  - スイッチの状態

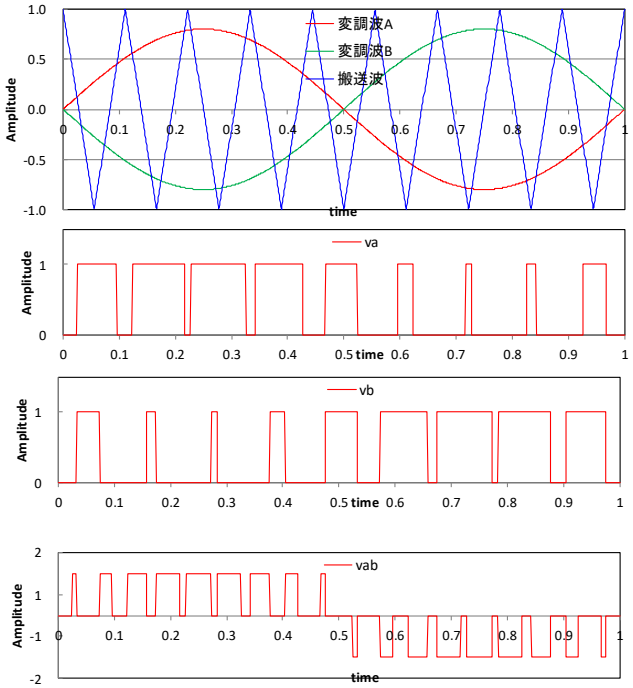
$$\begin{cases} ON: S_1, S_2 \rightarrow v_o = +V_{dc} \\ ON: S_3, S_4 \rightarrow v_o = -V_{dc} \end{cases}$$

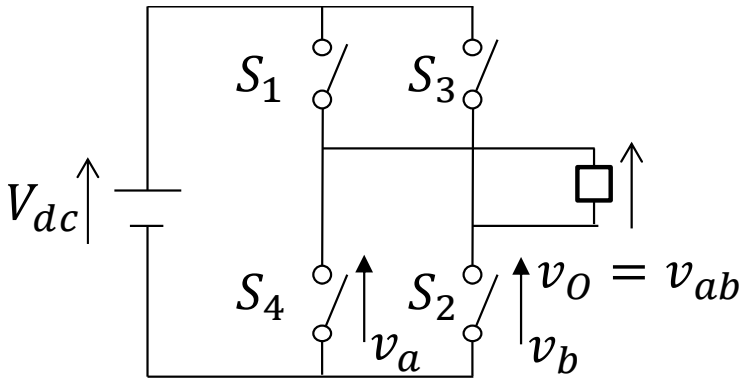




PWM制御

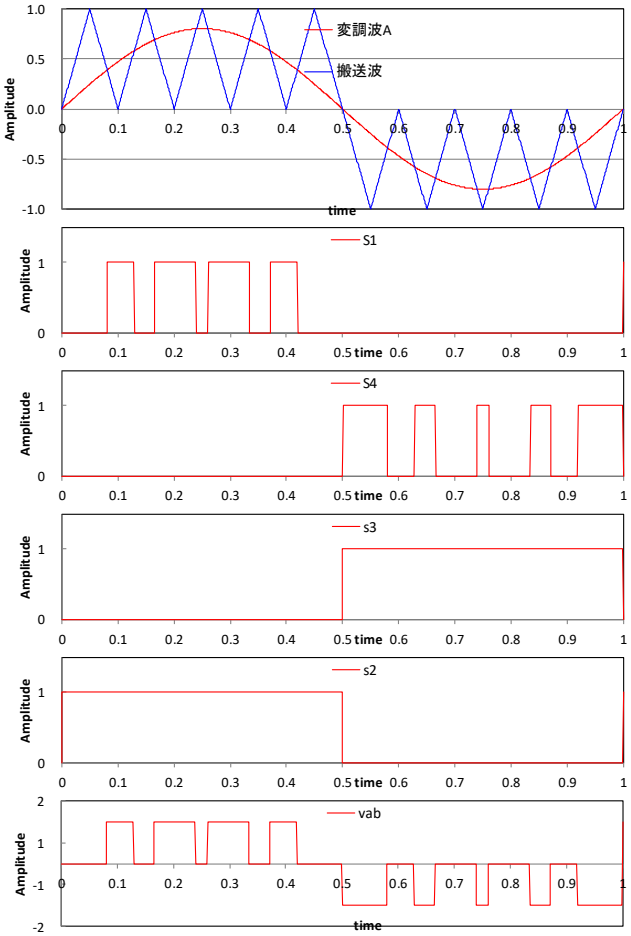
- ユニポーラ変調1
  - 出力電圧$+V_{dc}$,0または$-V_{dc}$,0の間で変化
  - スイッチの状態
    - S_1オン　　$v_{sin} > v_{tri}$
    - S_2オン　　$-v_{sin} < v_{tri}$
    - S_3オン　　$-v_{sin} > v_{tri}$
    - S_4オン　　$v_{sin} < v_{tri}$

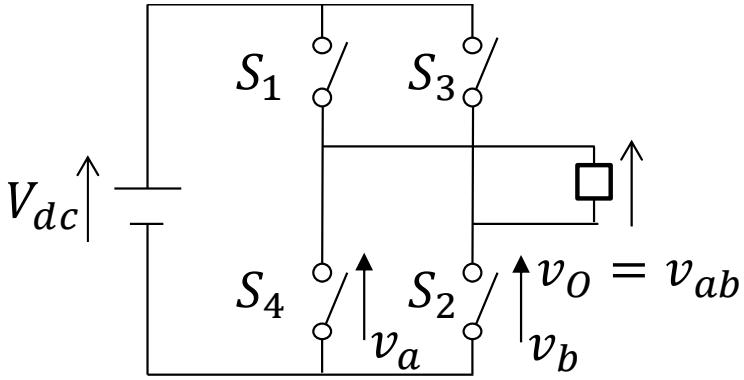




PWM制御

- 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
  - スイッチの状態
    - スイッチング周波数動作
      - S_1オン　　$v_{sin} > v_{tri}$
      - S_4オン　　$v_{sin} < v_{tri}$
    - 基本波周波数動作
      - S_2オン　　$v_{sin} > 0$
      - S_3オン　　$v_{sin} < 0$





PWM制御

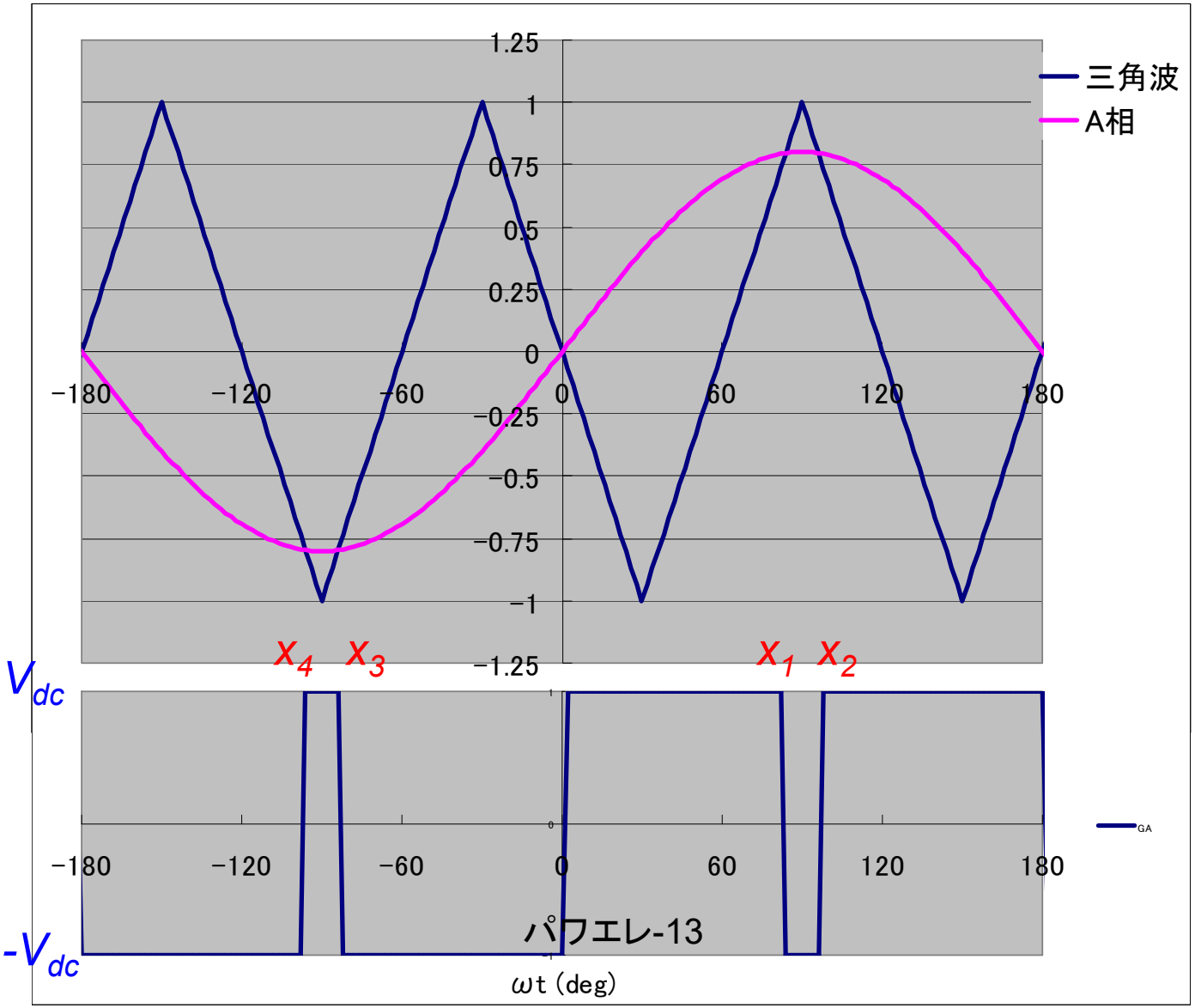
- 周波数変調比:$m_f = \frac{f_{carrier}}{f_{reference}} = \frac{f_{tri}}{f_{sin}}$
  - 搬送波と信号波の周波数の比
  - 比が大きいと高調波成分は高周波となる
- 振幅変調比:$m_a = \frac{V_{m,reference}}{V_{m,carrier}} = \frac{V_{m,sin}}{V_{m,tri}}$
  - 搬送波と信号波の振幅の比
  - $0 \leq m_a \leq 1$では基本波振幅はm_aに比例する
    - $V_1 = m_a V_{dc}$
  - $1 < m_a$では線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

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
    - スイッチングの周波数は，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
    - 比較的低いスイッチ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
    - スイッチングの周波数は，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
    - 比較的高いスイッチング周波数で用いる
      - 低いスイッチ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
  - 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
  - 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　-π～-5/6π　　y=6/πx+6
    - 区間②　-5/6π～-π/2　　y=-6/πx+4
    - 区間③　-π/2～-π/6　　y=6/πx+2
    - 区間④　-π/6～π/6　　y=-6/πx
    - 区間⑤　π/6～π/2　　y=6/πx-2
    - 区間⑥　π/2～-5/6π　　y=-6/πx+4
    - 区間⑦　π5/6～π　　y=6/πx-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
    - フーリエ級数展開

$$f(x)=\frac{a_0}{2}+\sum_{n=1}^{\infty}\{a_n\cos nx+b_n\sin nx\}$$

ただし　$a_0=0$

$$a_n=\frac{1}{\pi}\int_{-\pi}^{\pi}f(x)\cos nx\,dx$$

$$=\frac{}{n\pi}\left\{\begin{array}{l}\left[-V_{dc}\sin nx\right]_{-\pi}^{x_4}+\left[V_{dc}\sin nx\right]_{x_4}^{x_3}+\left[-V_{dc}\sin nx\right]_{x_3}^{0}\\+\left[V_{dc}\sin nx\right]_{0}^{x_1}+\left[-V_{dc}\sin nx\right]_{x_1}^{x_2}+\left[V_{dc}\sin nx\right]_{x_2}^{\pi}\end{array}\right\}$$

$$=\frac{V_{dc}}{n\pi}\left\{\begin{array}{l}-\sin nx_4+\sin(-n\pi)+\sin nx_3-\sin nx_4-\sin n0+\sin nx_3\\+\sin nx_1-\sin 0-\sin nx_2+\sin nx_1+\sin n\pi-\sin nx_2\end{array}\right\}$$

$$=\frac{V_{dc}}{n\pi}\left\{\begin{array}{l}\sin nx_2+0-\sin nx_1+\sin nx_2-0-\sin nx_1\\+\sin nx_1-0-\sin nx_2+\sin nx_1+0-\sin nx_2\end{array}\right\}=0$$

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

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

$$= \frac{1}{n\pi}\left\{\begin{array}{l}\left[V_{dc}\cos nx\right]_{-\pi}^{x_4} + \left[-V_{dc}\cos nx\right]_{x_4}^{x_3} + \left[V_{dc}\cos nx\right]_{x_3}^{0} \\ + \left[-V_{dc}\cos nx\right]_{0}^{x_1} + \left[V_{dc}\cos nx\right]_{x_1}^{x_2} + \left[-V_{dc}\cos nx\right]_{x_2}^{\pi}\end{array}\right\}$$

$$= \frac{V_{dc}}{n\pi}\left\{\begin{array}{l}\cos nx_4 - \cos(-n\pi) - \cos nx_3 + \cos nx_4 + \cos n0 - \cos nx_3 \\ -\cos nx_1 + \cos 0 + \cos nx_2 - \cos nx_1 - \cos n\pi + \cos nx_2\end{array}\right\}$$

$$= \frac{V_{dc}}{n\pi}\left\{\begin{array}{l}\cos nx_2 - (-1)^n - \cos nx_1 + \cos nx_2 + 1 - \cos nx_1 \\ -\cos nx_1 + 1 + \cos nx_2 - \cos nx_1 - (-1)^n + \cos nx_2\end{array}\right\}$$

$$= \frac{2V_{dc}}{n\pi}\left\{2\cos nx_2 - (-1)^n - 2\cos nx_1 + 1\right\}$$

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
    - フーリェ級数展開

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

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

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

    - 基本波の振幅

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

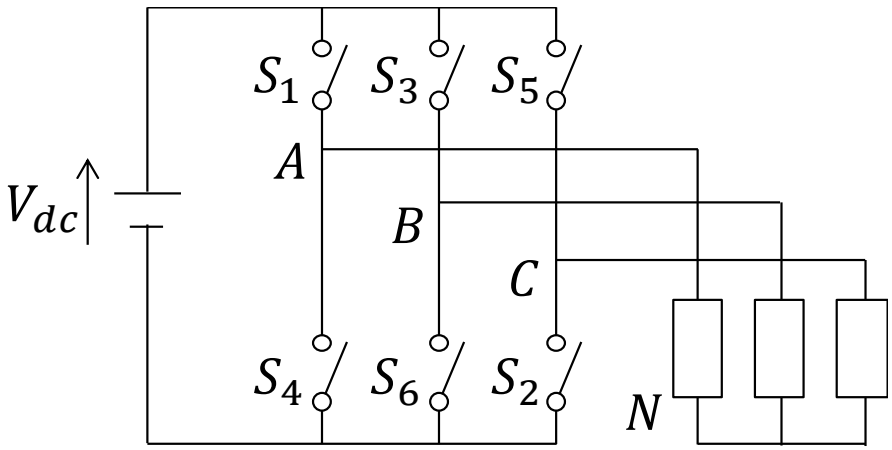
$$\frac{\pi}{4V_{dc}}b_1=1-2\cos x_1$$

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

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

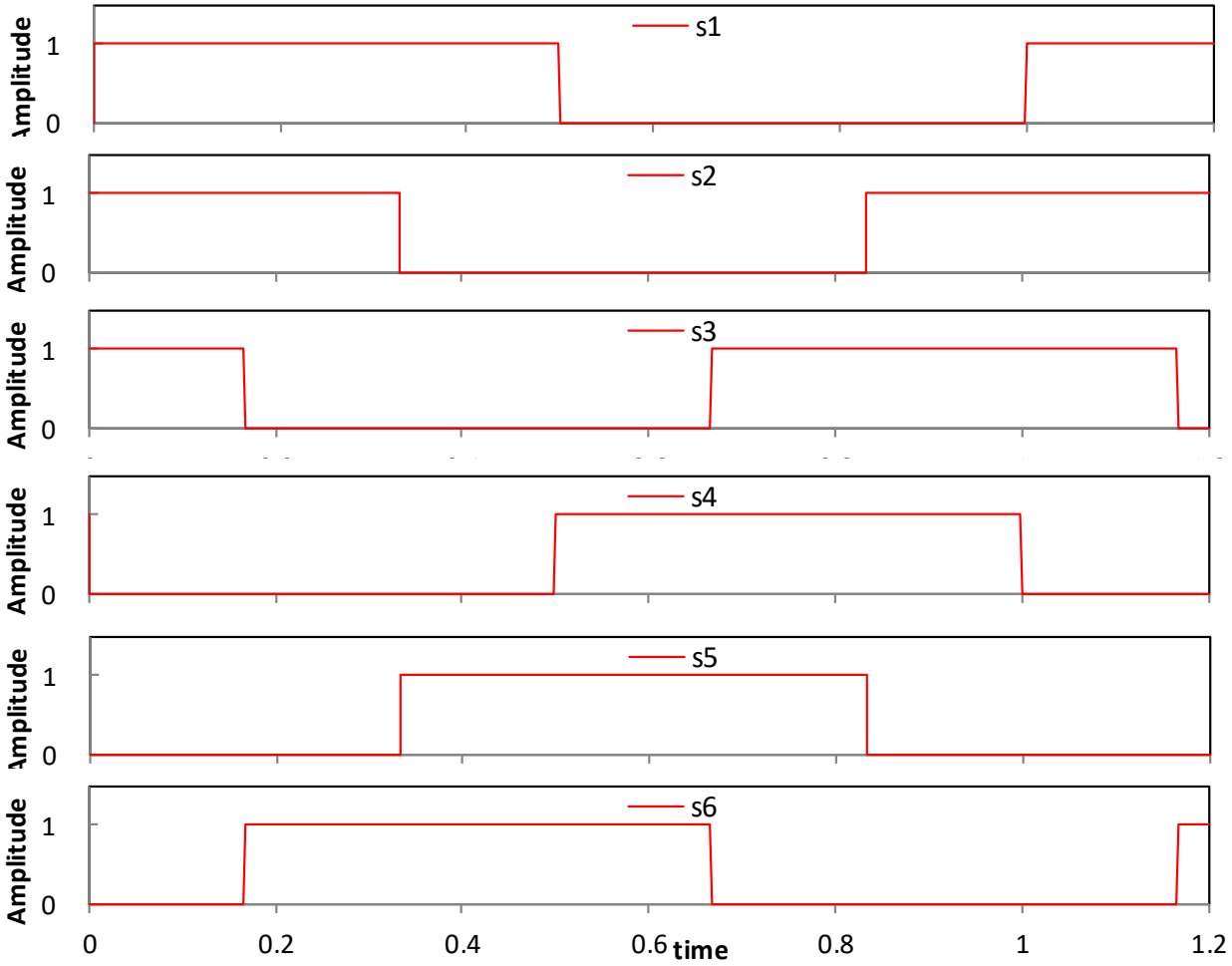
三相インバータ

- 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)



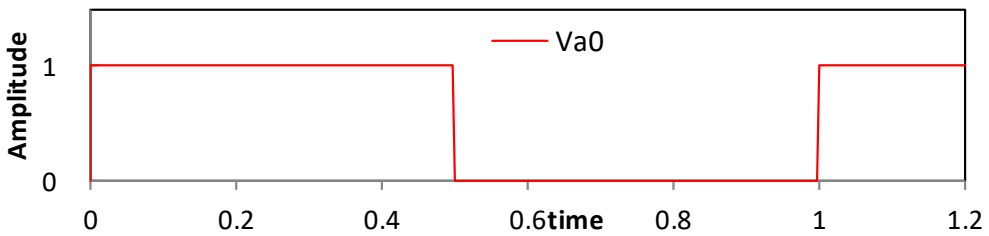
三相インバータ

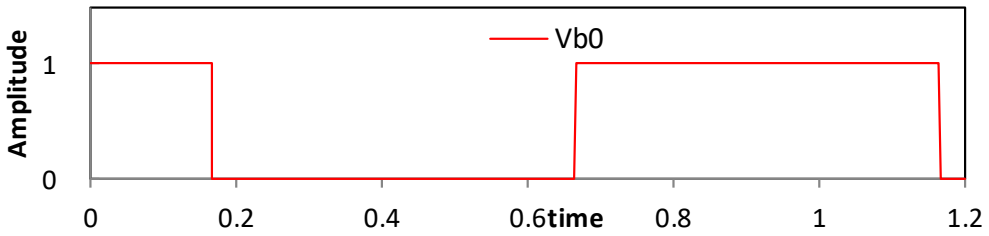
- スイッチ動作パターン

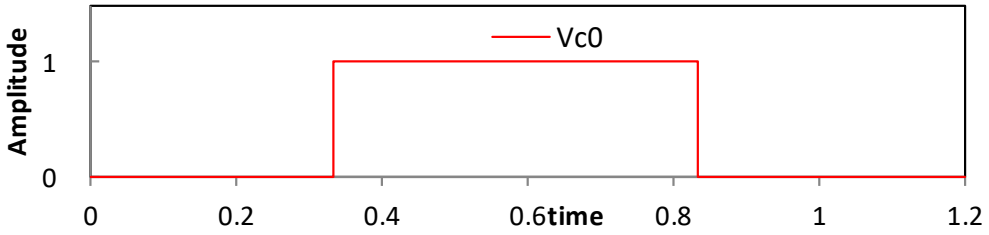


三相インバータ

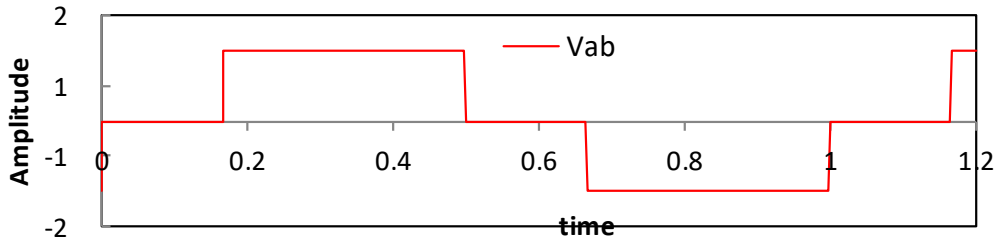
- 相出力電圧

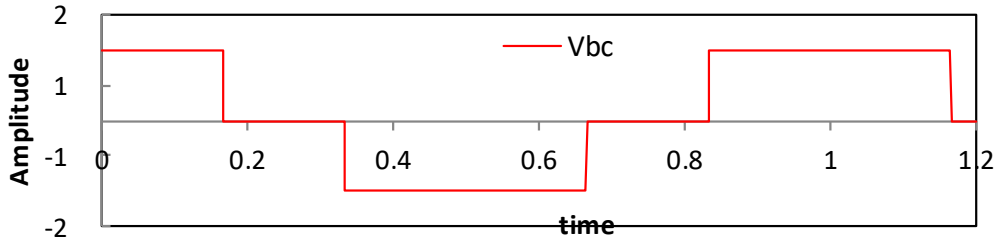


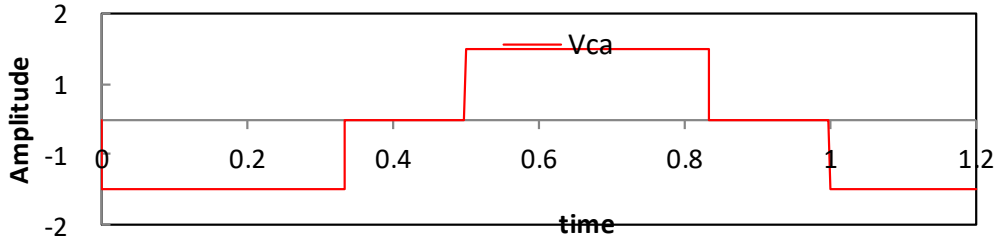




- 線間電圧

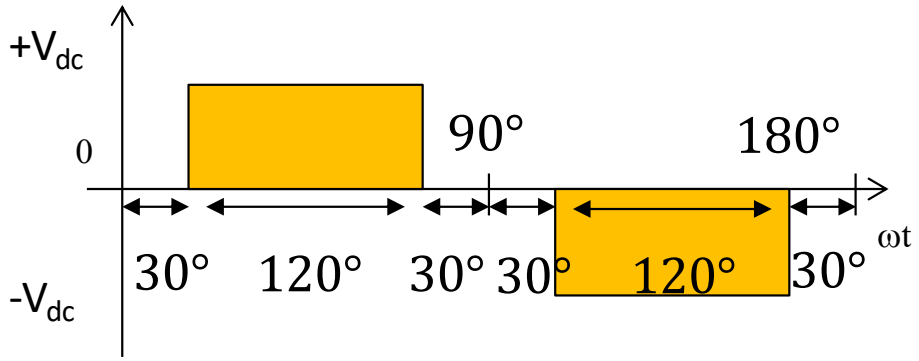






三相インバータ

- 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
  - $a_n = \frac{1}{\pi}\left\{\int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{5\pi}{6}} V_{dc}\cos n\omega t\, d\omega t + \int_{\frac{7\pi}{6}}^{\frac{11\pi}{6}} -V_{dc}\cos n\omega t\, d\omega t\right\}$

    $= \frac{V_{dc}}{\pi}\left\{\int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{5\pi}{6}} \cos n\omega t\, d\omega t - \int_{\frac{7\pi}{6}}^{\frac{11\pi}{6}} \cos n\omega t\, d\omega t\right\}$

三相インバータ

- 線間電圧V_{LL}の周波数スペクトル
  - $a_n = \frac{V_{dc}}{n\pi}\left[\sin n\omega t\right]_{\frac{\pi}{6}\ \frac{11\pi}{6}}^{\frac{5\pi}{6}\ \frac{7\pi}{6}}$

$$= \frac{V_{dc}}{n\pi}\left\{\sin\frac{5n\pi}{6} - \sin\frac{n\pi}{6} + \sin\frac{7n\pi}{6} - \sin\frac{11n\pi}{6}\right\}$$

$$= \frac{V_{dc}}{n\pi}\left\{\sin\frac{5n\pi}{6} - \sin\frac{n\pi}{6} - \sin\frac{5n\pi}{6} + \sin\frac{n\pi}{6}\right\}$$

$$= 0$$

三相インバータ

- 線間電圧V_{LL}の周波数スペクトル
  - $b_n = \frac{1}{\pi}\left\{\int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{5\pi}{6}} V_{dc}\sin n\omega t\, d\omega t + \int_{\frac{7\pi}{6}}^{\frac{11\pi}{6}} -V_{dc}\sin n\omega t\, d\omega t\right\}$

    $= \frac{V_{dc}}{\pi}\left\{\int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{5\pi}{6}} \sin n\omega t\, d\omega t - \int_{\frac{7\pi}{6}}^{\frac{11\pi}{6}} \sin n\omega t\, d\omega t\right\}$

三相インバータ

- 線間電圧V_{LL}の周波数スペクトル
  - $b_n = \frac{V_{dc}}{n\pi}\left[-\cos n\omega t\right]_{\frac{\pi}{6}\ \frac{11\pi}{6}}^{\frac{5\pi}{6}\ \frac{7\pi}{6}}$

$$= \frac{V_{dc}}{n\pi}\left\{-\cos\frac{5n\pi}{6}+\cos\frac{n\pi}{6}-\cos\frac{7n\pi}{6}+\cos\frac{11n\pi}{6}\right\}$$

$$= \frac{V_{dc}}{n\pi}\left\{-\cos\frac{5n\pi}{6}+\cos\frac{n\pi}{6}-\cos\frac{5n\pi}{6}+\cos\frac{n\pi}{6}\right\}$$

$$= \frac{2V_{dc}}{n\pi}\left\{\cos\frac{n\pi}{6}-\cos\frac{5n\pi}{6}\right\}$$

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