

パワエレ
舟木 担当分

第5回 平成20年7月14日3限目
パワーエレクトロニクス・応用編
「電圧形自励式変換器のPWM制御
モータ駆動」

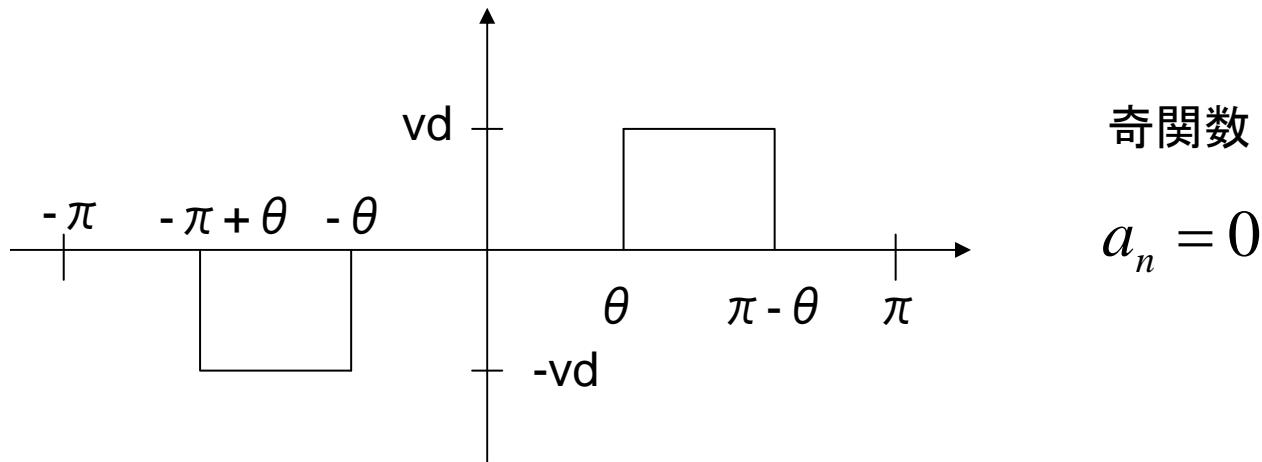
電圧型自励式変換器

- 単相電圧型自励式変換器回路図
 - 直流側を電圧源的に扱う
 - サイリスタ変換器では、電流源的に扱ったほうが容易に解析可能であった
 - 交流側に電圧を出力する
 - PWM制御で出力電圧を制御する
 - 直流電圧の極性一定
 - 電流は双方向
 - » サイリスタ変換器では、直流電流の極性一定
 - 逆並列ダイオードを接続した自己消弧素子
 - 上下の素子を相補的にオン・オフする
 - 交流側出力端子間に出力される電圧は、 $\pm V_{dc}$ または0
 - オン・オフ共にゲート信号で制御可能であることが必要
 - 交流側に電源が無くても転流可能
 - 交流電圧と直流電圧の関係で、電流が主スイッチ素子もしくは環流ダイオードを通るか決まる

自励式インバータ

- 電圧形自励式インバータ(单相)
 - 自己消弧素子
 - 逆並列環流ダイオード
 - 双方向なので、理想スイッチで表現可能
 - 自己消弧素子の逆耐圧不要
 - MOSFETのボディダイオードを使用可能
 - 出力電圧
 - $+V_{dc}$ 通流幅と出力電圧の関係
 - $-V_{dc}$ フーリエ級数展開
 - 0 通流幅で出力電圧の振幅変化する
基本波だけでなく、高調波も変化する

PWM変調の効果



$$\begin{aligned}
 b_n &= \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(\omega\tau) \sin n\omega\tau d\omega\tau = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} f(\omega\tau) \sin n\omega\tau d\omega\tau = \frac{2}{\pi} \int_{\theta}^{\pi-\theta} V_d \sin n\omega\tau d\omega\tau \\
 &= \frac{2V_d}{\pi} \left[-\frac{1}{n} \cos n\omega\tau \right]_{\theta}^{\pi-\theta} = \frac{2V_d}{n\pi} \left[-\cos n(\pi-\theta) + \cos n\theta \right] \\
 &= \frac{2V_d}{n\pi} \left[-\cos n\pi \cos n\theta - \sin n\pi \sin n\theta + \cos n\theta \right] \\
 &= \frac{2V_d}{n\pi} \left[-(-1)^n \cos n\theta + \cos n\theta \right] = \frac{2V_d}{n\pi} \left[1 - (-1)^n \right] \cos n\theta
 \end{aligned}$$

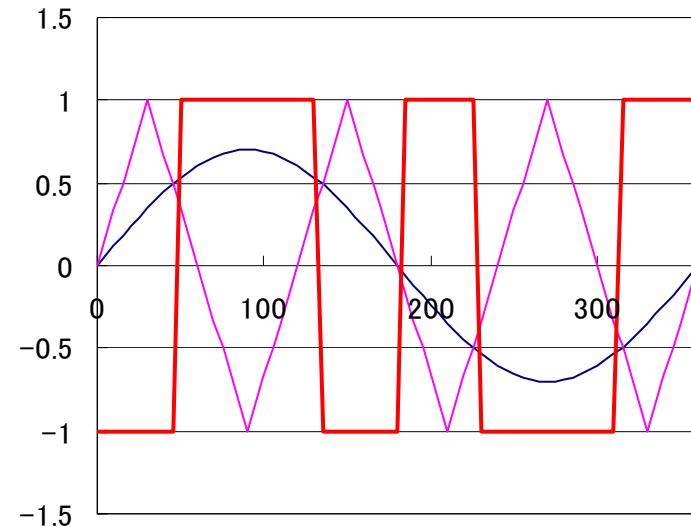
N=1 基本波
 N ≠ 1 高調波

電圧型自励式変換器

- 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

自励式インバータ

- 導通角を変化させることで出力電圧の大きさを変えることができる
- 容易にPWMパルスを発生する方法はないか?
 - 三角波比較によるPWM制御
 - 機械的に通流幅を決める
 - 三角波と信号波の関係
 - 同期PWM
 - 非同期PWM
 - キャリア周波数高



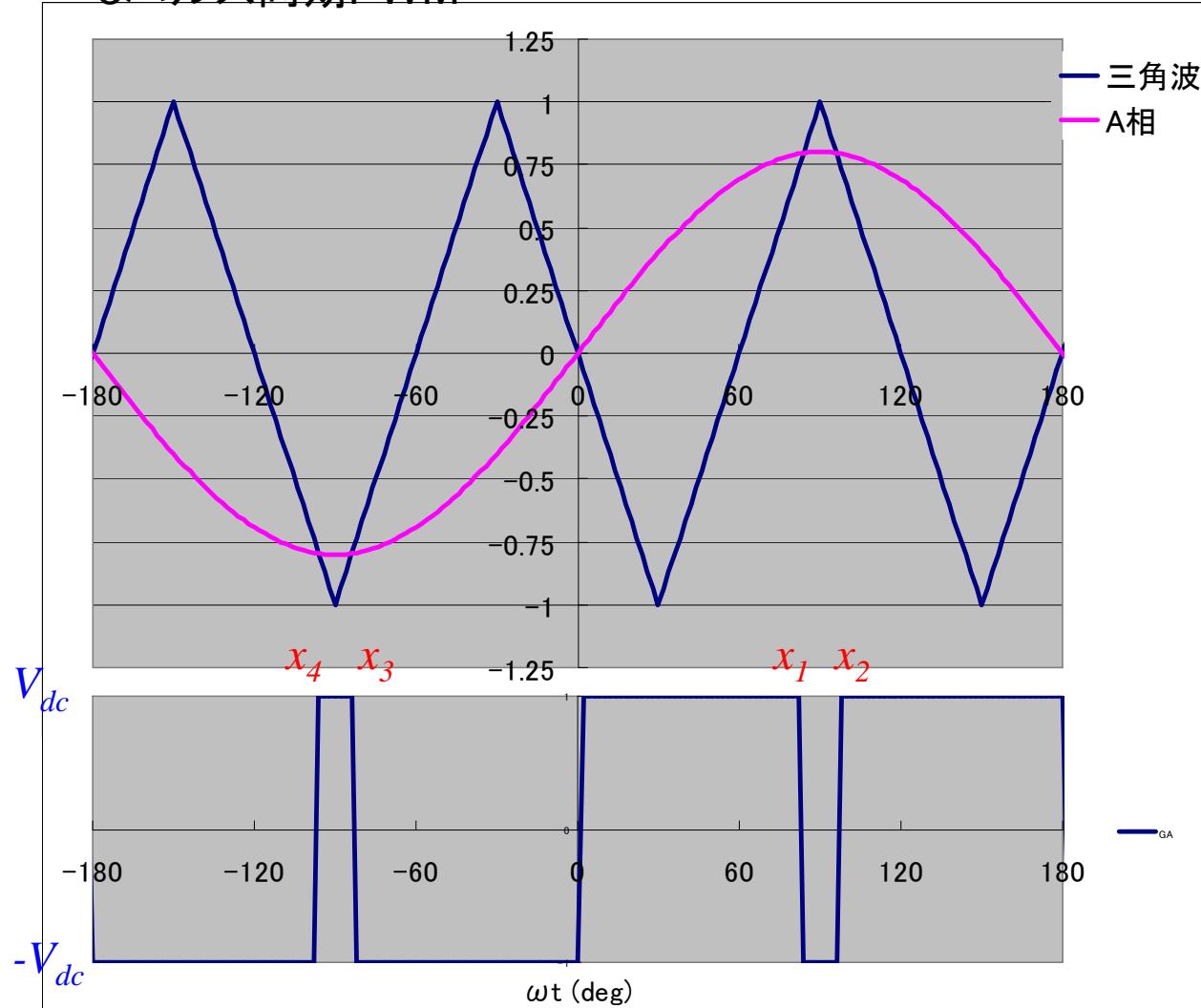
電圧型自励式変換器

- 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
 - 三角波と正弦波の図
 - » 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 $\pi 5/6 \sim \pi$ $y=6/\pi x-6$

電圧型自励式変換器

- 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

$$x_1 = -x_3$$

$$x_2 = -x_4$$

$$x_2 = \pi - x_1$$

電圧型自励式変換器

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

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

$$= \frac{1}{n\pi} \left\{ \left[-V_{dc} \sin nx \right]_{-\pi}^{x_4} + \left[V_{dc} \sin nx \right]_{x_4}^{x_3} + \left[-V_{dc} \sin nx \right]_{x_3}^0 \right. \\ \left. + \left[V_{dc} \sin nx \right]_0^{x_1} + \left[-V_{dc} \sin nx \right]_{x_1}^{x_2} + \left[V_{dc} \sin nx \right]_{x_2}^{\pi} \right\}$$

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

$$= \frac{V_{dc}}{n\pi} \left\{ \sin nx_2 + 0 - \sin nx_1 + \sin nx_2 - 0 - \sin nx_1 \right. \\ \left. + \sin nx_1 - 0 - \sin nx_2 + \sin nx_1 + 0 - \sin nx_2 \right\} = 0$$

ただし $a_0 = 0$

電圧型自励式変換器

- 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

$$\begin{aligned} b_n &= \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \sin nx dx \quad \text{– フーリエ級数展開} \\ &= \frac{1}{n\pi} \left\{ \begin{aligned} & [V_{dc} \cos nx]_{-\pi}^{x_4} + [-V_{dc} \cos nx]_{x_4}^{x_3} + [V_{dc} \cos nx]_{x_3}^0 \\ & + [-V_{dc} \cos nx]_0^{x_1} + [V_{dc} \cos nx]_{x_1}^{x_2} + [-V_{dc} \cos nx]_{x_2}^{\pi} \end{aligned} \right\} \\ &= \frac{V_{dc}}{n\pi} \left\{ \begin{aligned} & \cos nx_4 - \cos(-n\pi) - \cos nx_3 + \cos nx_4 + \cos n0 - \cos nx_3 \\ & - \cos nx_1 + \cos 0 + \cos nx_2 - \cos nx_1 - \cos n\pi + \cos nx_2 \end{aligned} \right\} \\ &= \frac{V_{dc}}{n\pi} \left\{ \begin{aligned} & \cos nx_2 - (-1)^n - \cos nx_1 + \cos nx_2 + 1 - \cos nx_1 \\ & - \cos nx_1 + 1 + \cos nx_2 - \cos nx_1 - (-1)^n + \cos nx_2 \end{aligned} \right\} \\ &= \frac{2V_{dc}}{n\pi} \left\{ 2 \cos nx_2 - (-1)^n - 2 \cos nx_1 + 1 \right\} \end{aligned}$$

電圧型自励式変換器

- 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

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

電圧型自励式変換器

- 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

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

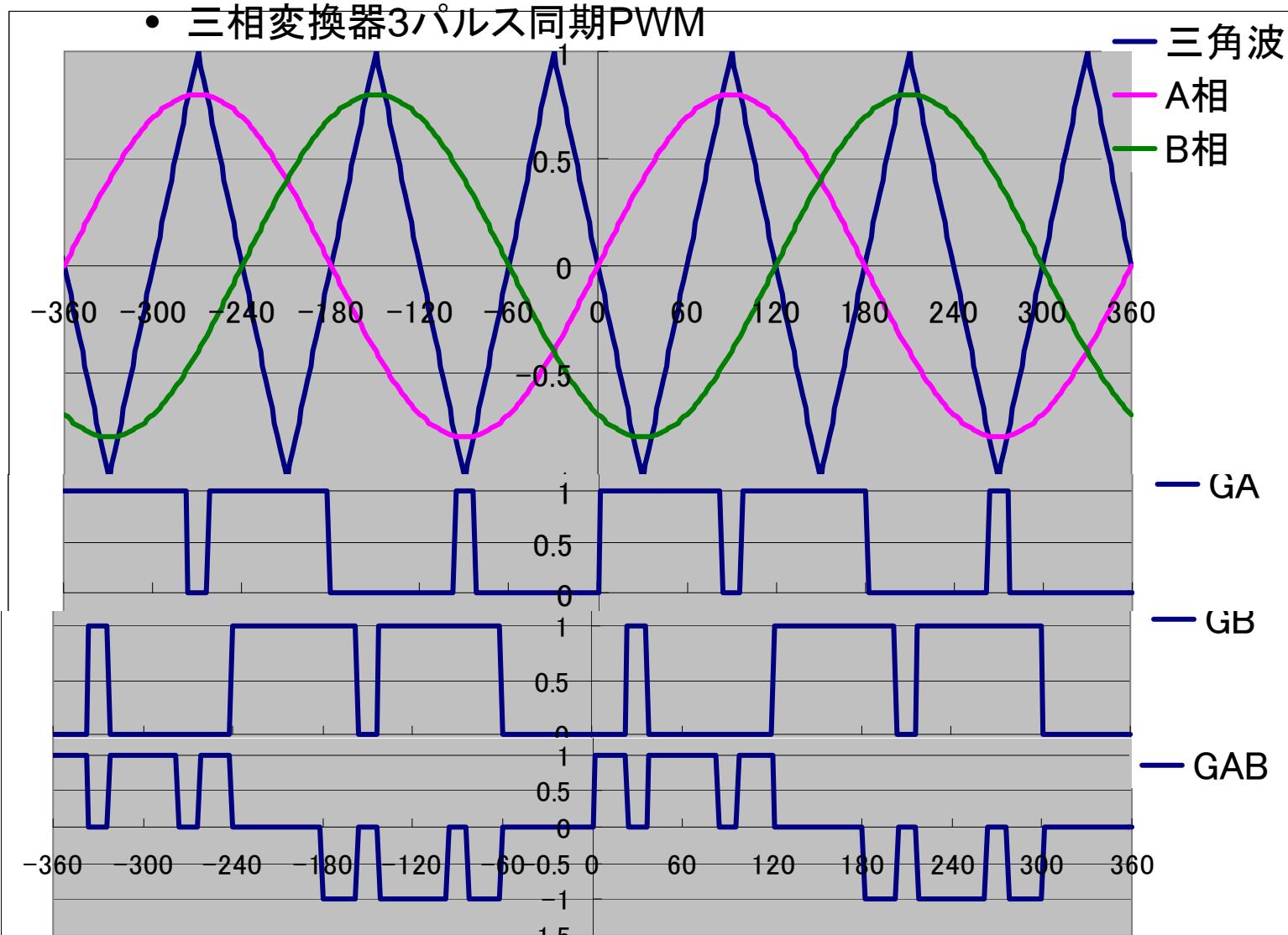
$$\frac{\pi}{4V_{dc}} b_1 = 1 - 2 \cos x_1$$

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

$$\rightarrow A = \frac{\frac{6}{\pi} x_1 - 2}{\sin x_1} = \frac{\frac{6}{\pi} \cos^{-1} \frac{2 - \pi b_1}{8V_{dc}} - 2}{\sqrt{1 - \left(\frac{2 - \pi b_1}{8V_{dc}} \right)^2}} \rightarrow b_1 \cong \frac{4V_{dc}}{12} A$$

電圧型自励式変換器

- 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



PWMによる出力制御

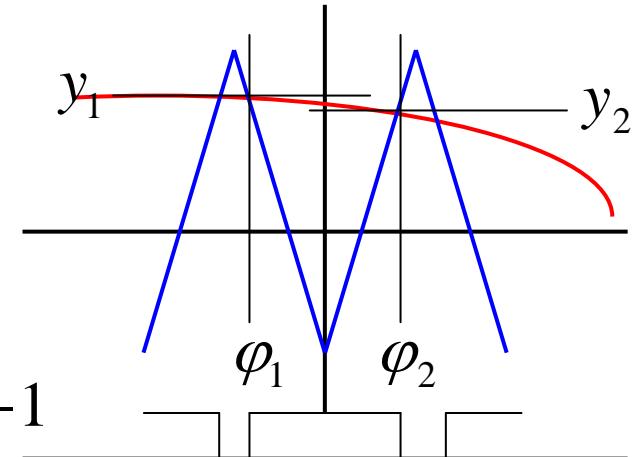
- 三角波比較によるPWMパルスの生成
 - 多パルス, 同期・非同期対応

- 信号波

$$e_s = M \sin(\omega_s t + \gamma)$$

- 搬送波

$$\begin{cases} Y = -\frac{2}{\pi}X + \alpha & (-\pi + \delta \leq X \leq \delta) \\ Y = \frac{2}{\pi}X + \beta & (\delta \leq X \leq \pi + \delta) \end{cases} \begin{cases} \alpha = \frac{2}{\pi}\delta - 1 \\ \beta = -\frac{2}{\pi}\delta - 1 \end{cases}$$



$Y = M \sin(y + \gamma)$ で信号波と搬送波が交わるとする 但し $y = \omega_s t$

ϕ と y の関係 $\begin{cases} M \sin(y + \gamma) = -\frac{2}{\pi}\phi + \alpha \\ M \sin(y + \gamma) = \frac{2}{\pi}\phi + \beta \end{cases} \rightarrow \begin{cases} \phi_1 = -\frac{\pi}{2}(M \sin(y + \gamma) - \alpha) \\ \phi_2 = \frac{\pi}{2}(M \sin(y + \gamma) - \beta) \end{cases}$

- ゲート信号は搬送波と信号波の関数で表される

$$G(\omega_s t, \omega_b t)$$

ω_s, ω_b が整数比でない場合, 非周期的になる。
複素二重フーリエ級数展開により解析

変換器によるモーター駆動

電動機の種類とコンバータによる駆動

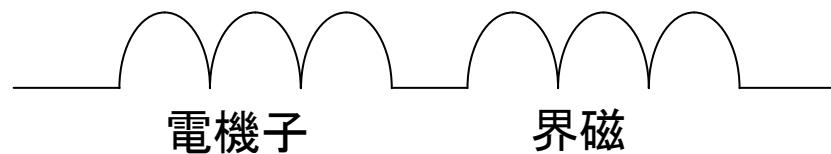
変換器によるモーター駆動

- 電動機の種類とコンバータによる駆動
 - 直流機
 - 交流機
 - 非同期機
 - 誘導機
 - 同期機
 - 外部励磁
 - 永久磁石
 - リラクタンス
 - ステッピングモータ

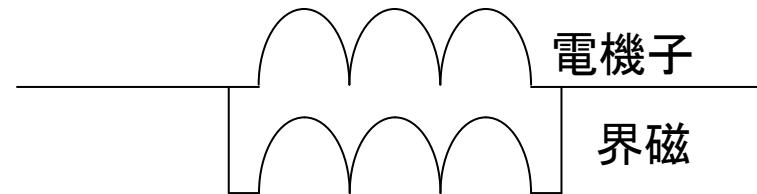
変換器によるモーター駆動

- 直流電動機の種類

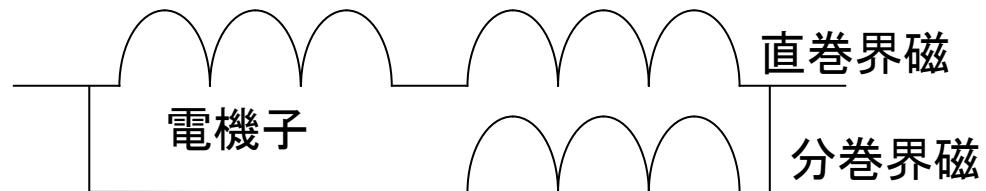
- 直巻電動機



- 分巻電動機

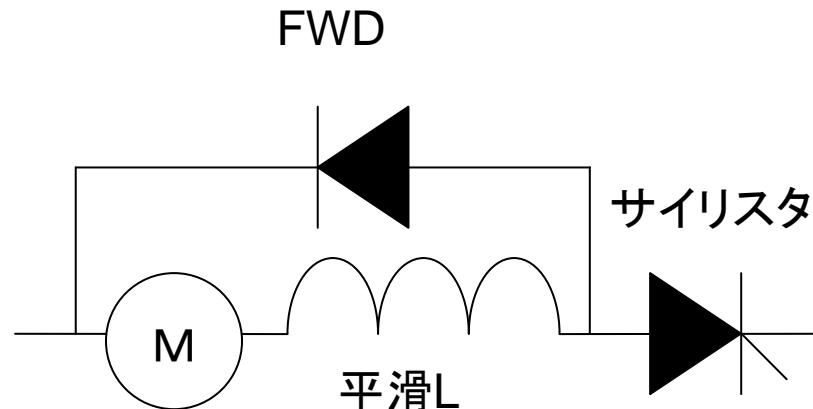


- 複巻電動機



直流機の制御

- 直流機の交流駆動
 - ワードレオナード
 - 誘導機で直流発電機を駆動(MGセット)
 - 直流発電機の界磁制御で直流電圧を調整
 - 直流発電機出力で直流電動機を駆動
 - サイリスタレオナード
 - サイリスタ変換器でMGセットの役割を果たす
- 直流機の直流駆動
 - サイリスタチョッパー
 - バックコンバータの変形
 - 入れる場所で特性変わる



変換器によるモーター駆動

- 交流機の種類とコンバータ駆動による制御
 - 非同期機
 - 誘導機
 - 同期機
 - 外部励磁
 - 永久磁石
 - リラクタンス
- 可变速驱动
 v/f 一定制御
ベクトル制御
- 高効率
最近の主流
位置検出・高度な演算必要

誘導機の可变速駆動

- 一次電圧制御法
 - かご型, 卷線型に関わらず可能
 - トルクは電圧の二乗に比例
- 一次周波数制御法
 - v/f 一定制御
 - トルクが一定になる
 - ベクトル制御
 - 発生トルクの瞬時的な制御
- 二次電圧制御法
 - 卷線型のみ可能

誘導機の可变速駆動(2次側)

- 静止セルビウス方式
 - 卷線誘導機の二次出力電力を電源に回生
 - MGで回生も可能(静止ではない)
 - ダイオード整流器とサイリスタ逆変換
 - 滑りが点弧角で制御可能
- 静止クレーマ方式
 - 卷線誘導機の二次出力電力で直流電動機駆動
 - 機械出力として戻す
 - 直流機
 - 電機子電流ダイオード整流(静止)
 - 界磁電流のサイリスタ制御
- 二次周波数制御方式
 - 卷線誘導機の二次出力の交流電力を制御
 - 二次側の周波数を直接制御
 - 変換器により、二次側に電力供給可能
 - 同期速度以上の回転可能

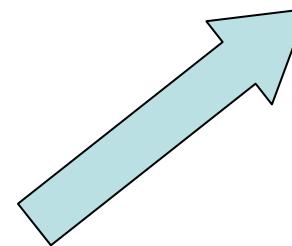
変換器によるモーター駆動

- ブラシ付DCモーターとブラシレスDCモーター
 - ブラシ付DCモーター
 - 固定子で界磁
 - 電磁磁石, 永久磁石での大きな違いはない
 - 機械接点による導通状態の切り替え
 - 接点寿命
 - 回転子位置検出と一体化
 - ブラシレスDCモーター
 - 回転子で界磁
 - 永久磁石化することで, スリップリング省略可
 - 半導体スイッチによる導通状態の切り替え
 - 長寿命
 - 回転子位置検出必要

矩形波駆動
正弦波駆動

ステッピングモーター

- DCモーター
- ACモーター
 - 回転
- サーボモーター
 - 回転・停止
 - ステッピングモーター
 - 一定の回転角度でステップ状に回転・停止
 - オープンループ制御可能



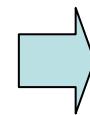
•復元力と安定点

ステッピングモーター

- 可変リラクタンス(VR)型
 - 突極性
 - 磁気抵抗変化
 - 吸引力利用
- 永久磁石(PM)型
 - 回転子に永久磁石
 - 固定子との吸引・反発力利用
 - 非突極
 - リラクタンスの影響なくす
- ハイブリッド(HB)型
 - PM型とVR型の両方の組み合わせ
 - 回転子に永久磁石
 - 突極性を持った回転子
 - 磁気抵抗変化
 - ステップ分解能、トルク、および速度に関してより優れた性能を持っている
 - 代表的なステップ角度は3.6 ~0.9度(100~400ステップ/回転)
 - モータの残留、保持および動的トルク特性の幅が拡がっている
 - 現在の主流
 - PM型よりも高価

ステッピングモーター

- 駆動方式
 - 定電圧駆動
 - 構成簡単
 - 立ち上り, 下がりの遅れ
 - 定電流駆動
 - トルク安定
 - 複雑
 - バイポーラ駆動
 - 正負両方向に導通
 - ユニポーラ駆動
 - 一方向のみ導通
 - 巻き線を二組用意
- 周波数トルク特性
 - 保持トルク
 - 自起動領域
 - スル一領域
- 復元力と安定点
 - 位置制御
 - 無負荷時との角度差
 - ステップ角精度
 - 慣性力とトルク
 - 速度制御
 - パルスの周波数



ステッピングモータのトルク特性

