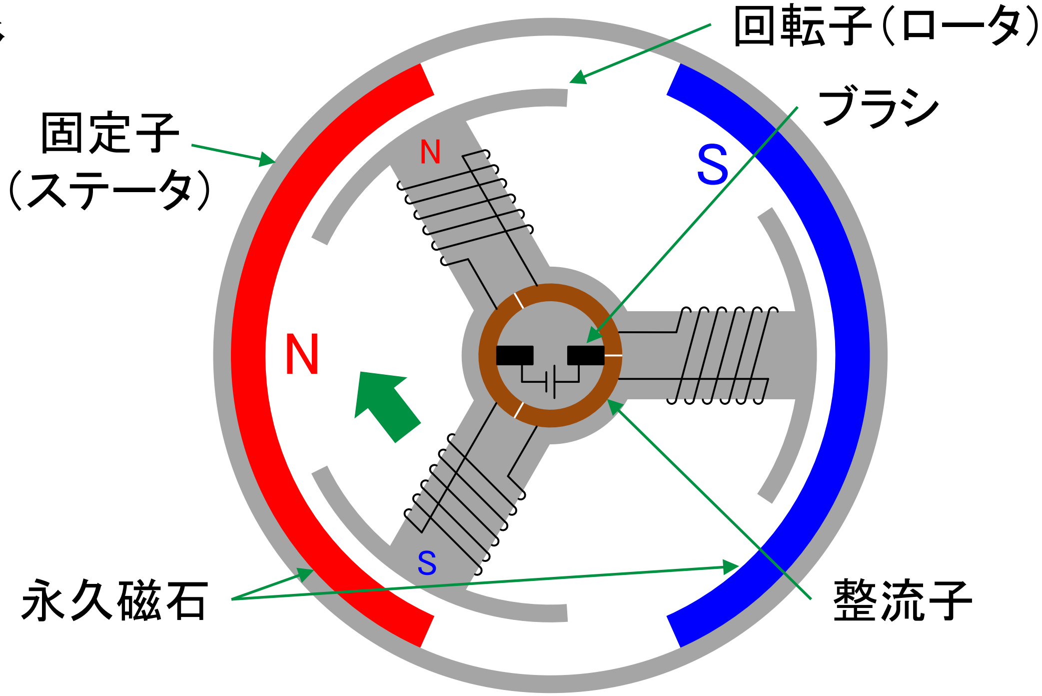
直流(DC)モータ

長岡モーターディベロップメント株式会社

DCモータ→モータの基本形

- 電源は直流
- ブラシと整流子によりコイル電流が転流
- 回転数は電圧に比例
- トルクは電流に比例

➡ 制御が非常に簡単



DCモータの模式図

最大の欠点

- 回転するほどブラシ、整流子が摩耗

⬇

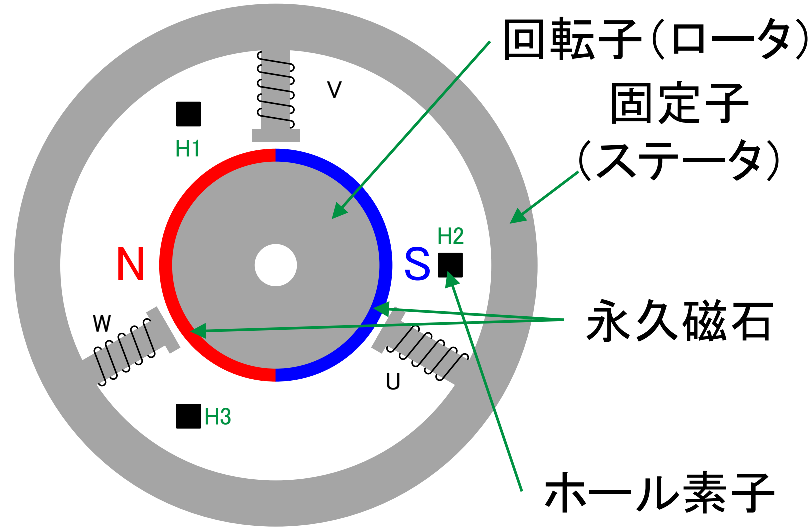
定期的なメンテナンスが不可欠

出典　赤津:「最新版 モータ技術のすべてがわかる本 (史上最強カラー図解)」, ナツメ社

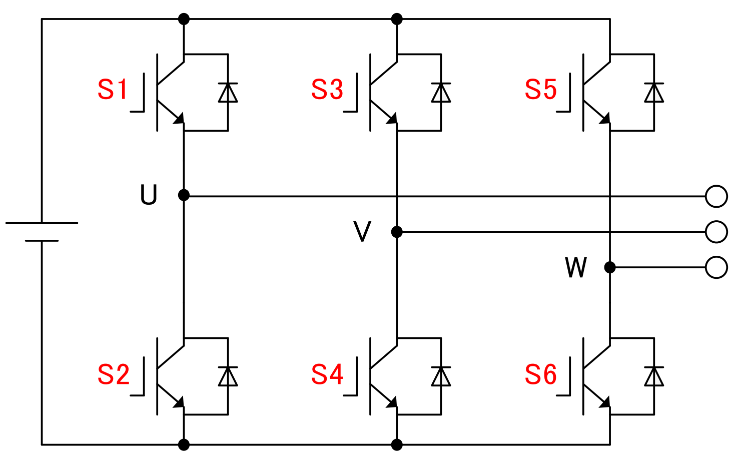
ブラシレスDCモータ

長岡モーターディベロップメント株式会社

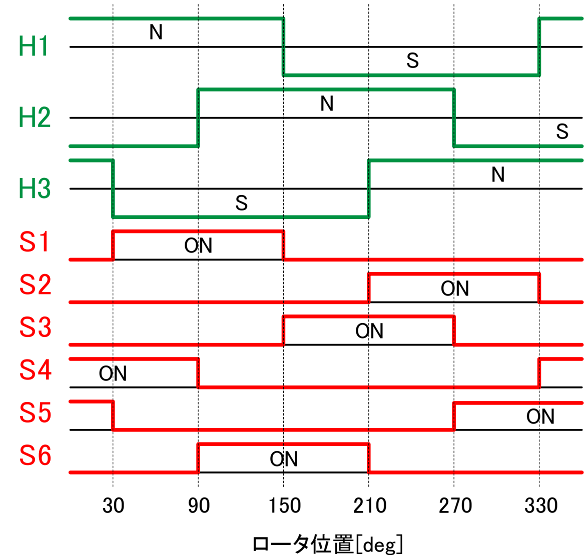
- DCモータからブラシ、整流子をなくしたモータ
  - ➡「ブラシレスDCモータ」メンテナンスが楽に
- 回転子の永久磁石により界磁
- 回転子位置に応じて通電方向を切替
  - ➡ インバータが必要



ブラシレスDCモータの模式図



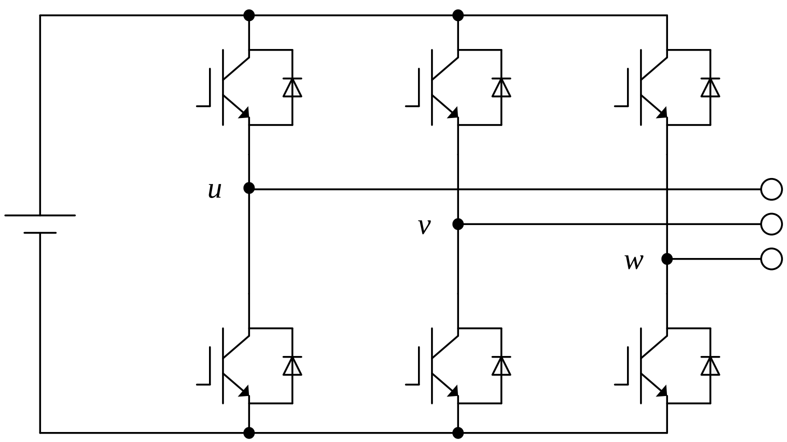
インバータ回路図



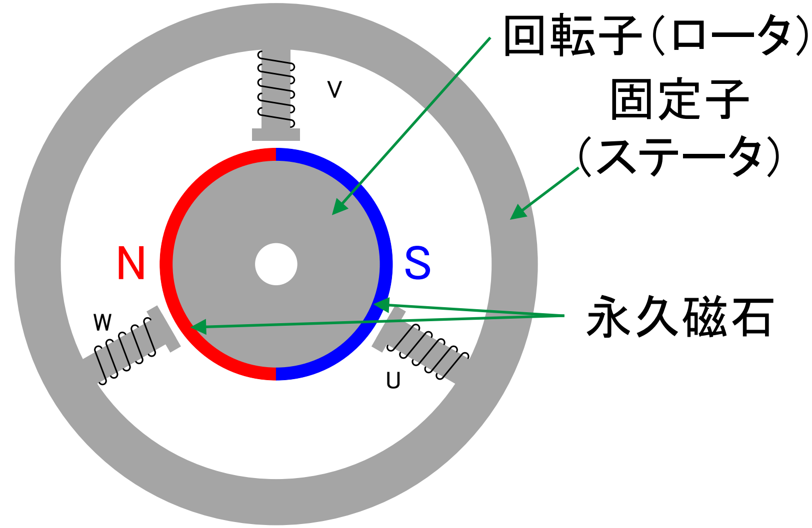
インバータのスイッチング例

永久磁石同期モータ

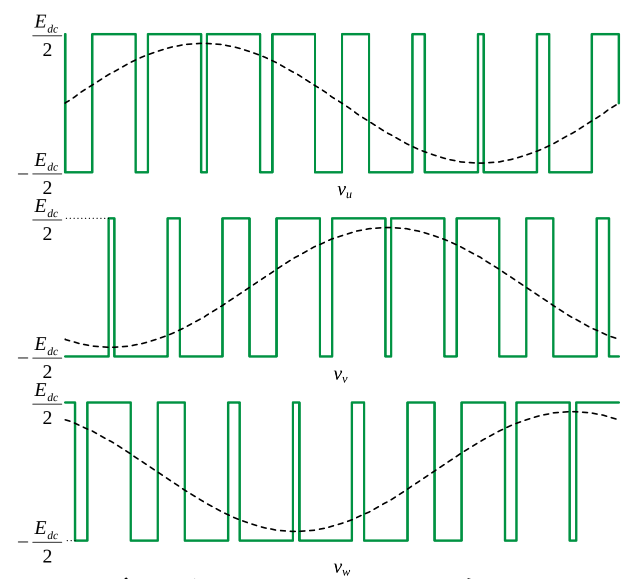
- 永久磁石を用いて小型、高効率化を狙ったモータ
  - ➡「永久磁石同期モータ」
  - (Permanent Magnet Synchronous Motor)
- 二次電流なし→高効率
- 回転子位置に同期した電圧を印加
  - ➡ インバータが必要



- 疑似正弦波電圧により駆動



PMモータの模式図



インバータの出力電圧例(PWM)

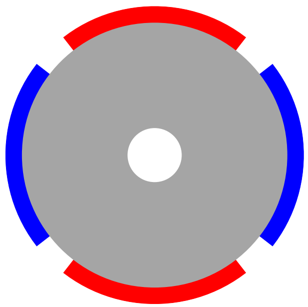
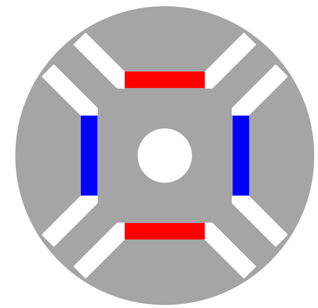
ブラシレスDCモータとPMモータの違い

	ブラシレスDCモータ（BLDCモータ）	永久磁石同期モータ（PMモータ）
磁石着磁	台形波	正弦波
インバータ通電	120度（方形波）	180度（正弦波）
位置センサ	ホール素子	エンコーダ レゾルバ
置替前	DCモータ	IM
用途	家電	産業、自動車

基本構造、回転原理は一緒だが思想が異なる

永久磁石同期モータの種類

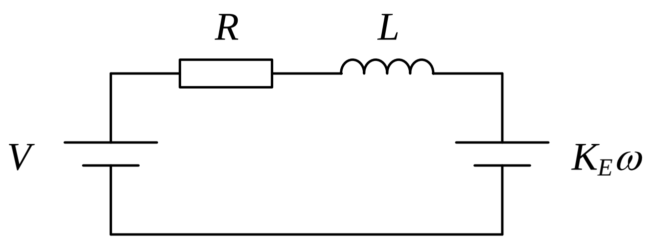
ロータ構造によって大きく二つに分類

	表面磁石同期モータ （Surface Permanent Magnet Synchronous Motor） 	埋込磁石同期モータ （Interior Permanent Magnet Synchronous Motor） 
発生トルク	マグネットトルク	マグネットトルク リラクタンストルク
インダクタンス	$L_d = L_q$ （ロータ位置によらず一定）	$L_d < L_q$ （ロータ位置よって変化）
制御系の構築	容易	少し複雑
センサレス制御	低速は困難	容易
用途	位置決め	家電、産業、自動車

本セミナーでは主にSPMモータを扱う

DCモータの各種方程式

等価回路



電圧方程式

$$V = \left(R + \frac{d}{dt} L \right) I + K_E \omega$$

トルクの式

$$T = K_T I$$

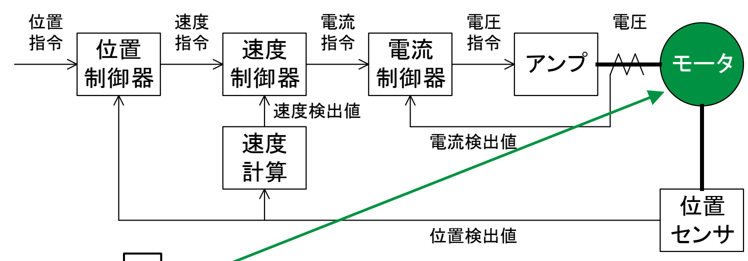
運動方程式(どのモータでも同じ)

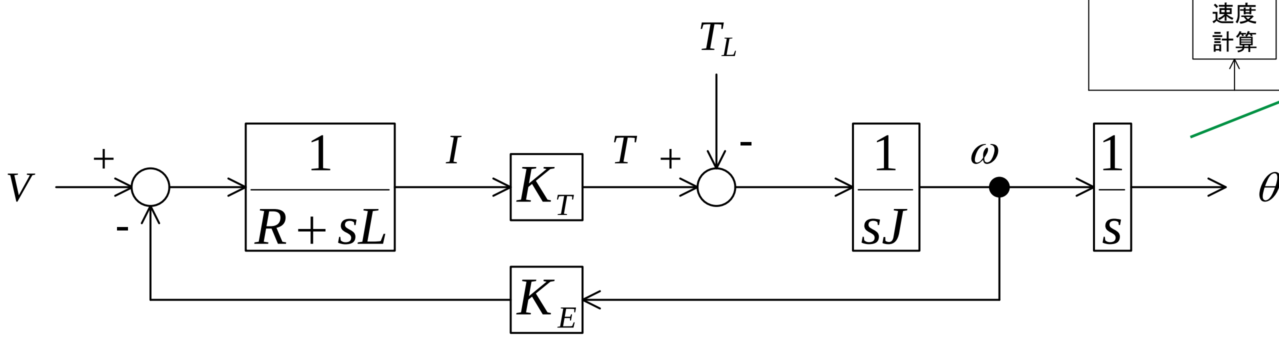
$$\frac{d}{dt}\omega = \frac{1}{J}(T - T_L)$$

$$\frac{d}{dt}\theta = \omega$$

V: 電圧、I: 電流、R: 巻線抵抗、L: 巻線インダクタンス、J: 慣性モーメント、
T: トルク、ω: 速度、θ: 位置、K_T: トルク定数、K_E: 誘起電圧定数、T_L: 負荷トルク

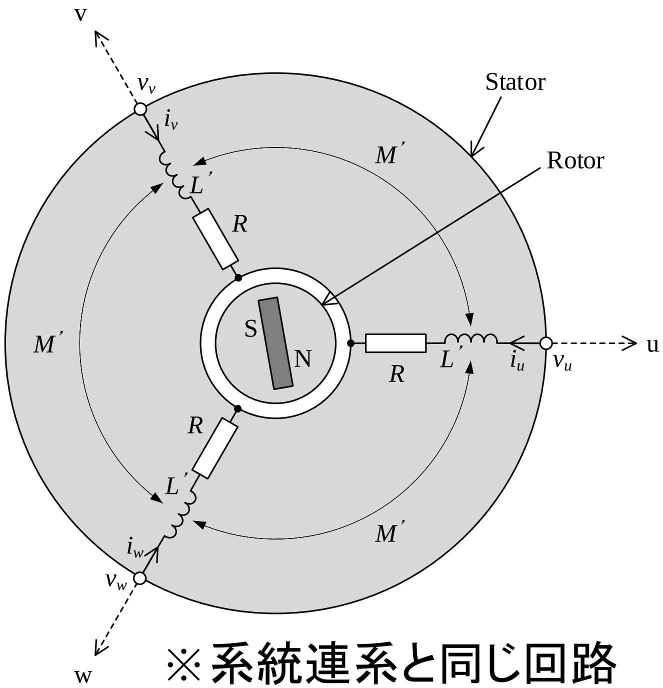
DCモータの伝達関数モデル(プラント)





PMモータの「本来」の電圧方程式

等価回路



※系統連系と同じ回路

電圧方程式

$$\begin{bmatrix} v_u \\ v_v \\ v_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R+\frac{d}{dt}L' & \frac{d}{dt}M' & \frac{d}{dt}M' \\ \frac{d}{dt}M' & R+\frac{d}{dt}L' & \frac{d}{dt}M' \\ \frac{d}{dt}M' & \frac{d}{dt}M' & R+\frac{d}{dt}L' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_u \\ i_v \\ i_w \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\omega_e \Phi'_{fa} \sin\theta_e \\ -\omega_e \Phi'_{fa} \sin\left(\theta_e - \frac{2}{3}\pi\right) \\ -\omega_e \Phi'_{fa} \sin\left(\theta_e + \frac{2}{3}\pi\right) \end{bmatrix}$$

L’: 自己インダクタンス、M’: 相互インダクタンス、
p: 極対数、ω_e: 電気角周波数(=$p\omega$)、
Φ'_{fa}: 鎖交磁束最大値

PMモータの電圧方程式をそのまま扱うのは大変
(DCモータと同じように扱いたい)

➡「座標変換」を行う

三相座標→直交静止(α-β)座標

$$\begin{bmatrix} v_u \\ v_v \\ v_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R+\frac{d}{dt}L' & \frac{d}{dt}M' & \frac{d}{dt}M' \\ \frac{d}{dt}M' & R+\frac{d}{dt}L' & \frac{d}{dt}M' \\ \frac{d}{dt}M' & \frac{d}{dt}M' & R+\frac{d}{dt}L' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_u \\ i_v \\ i_w \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\omega_e \Phi'_{fa} \sin\theta_e \\ -\omega_e \Phi'_{fa} \sin\left(\theta_e - \frac{2}{3}\pi\right) \\ -\omega_e \Phi'_{fa} \sin\left(\theta_e + \frac{2}{3}\pi\right) \end{bmatrix}$$

変換行列を用いる

$$[C] = K \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}$$

絶対変換の場合、$K=\sqrt{\frac{2}{3}}$

相対変換の場合、$K=\frac{2}{3}$

$$\boxed{\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R+\frac{d}{dt}L & 0 \\ 0 & R+\frac{d}{dt}L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} + \omega_e \Phi_{fa} \begin{bmatrix} -\sin\theta_e \\ \cos\theta_e \end{bmatrix}}$$

※絶対変換でも相対変換でも式は同じになってしまう(後述)

直交静止(α-β)座標→直交回転(d-q)座標

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R + \frac{d}{dt}L & 0 \\ 0 & R + \frac{d}{dt}L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} + \omega_e \Phi_{fa} \begin{bmatrix} -\sin\theta_e \\ \cos\theta_e \end{bmatrix}$$

変換行列を用いる

$$[C] = \begin{bmatrix} \cos\theta_e & \sin\theta_e \\ -\sin\theta_e & \cos\theta_e \end{bmatrix}$$

θ_eを使うため、ロータ位置情報が不可欠

$$\boxed{\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R + \frac{d}{dt}L & \omega_e L \\ -\omega_e L & R + \frac{d}{dt}L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_e \Phi_{fa} \end{bmatrix}}$$

➡ PMモータの「一般的」な電圧方程式

以下の変換行列を使えば三相交流→直交回転が可能

$$[C] = K \begin{bmatrix} \cos\theta_e & \cos\left(\theta_e - \frac{2}{3}\pi\right) & \cos\left(\theta_e + \frac{2}{3}\pi\right) \\ -\sin\theta & -\sin\left(\theta_e - \frac{2}{3}\pi\right) & -\sin\left(\theta_e + \frac{2}{3}\pi\right) \end{bmatrix}$$

PMモータの各種方程式のまとめ

長岡モーターディベロップメント株式会社

電圧方程式

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R + \frac{d}{dt}L & \omega_e L \\ -\omega_e L & R + \frac{d}{dt}L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_e \Phi_{fa} \end{bmatrix}$$

運動方程式（どのモータでも同じ）

$$\frac{d}{dt}\omega = \frac{1}{J}\left(T - T_L\right)$$

$$\frac{d}{dt}\theta = \omega$$

トルクの式（マグネットトルクのみ）

$$T = p\Phi_{fa} i_q \qquad \text{（絶対変換）}$$

$$T = \frac{3}{2} p\Phi_{fa} i_q \qquad \text{（相対変換）}$$

（参考：DCモータの場合）

電圧方程式

$$V = \left(R + \frac{d}{dt}L\right)I + K_E \omega$$

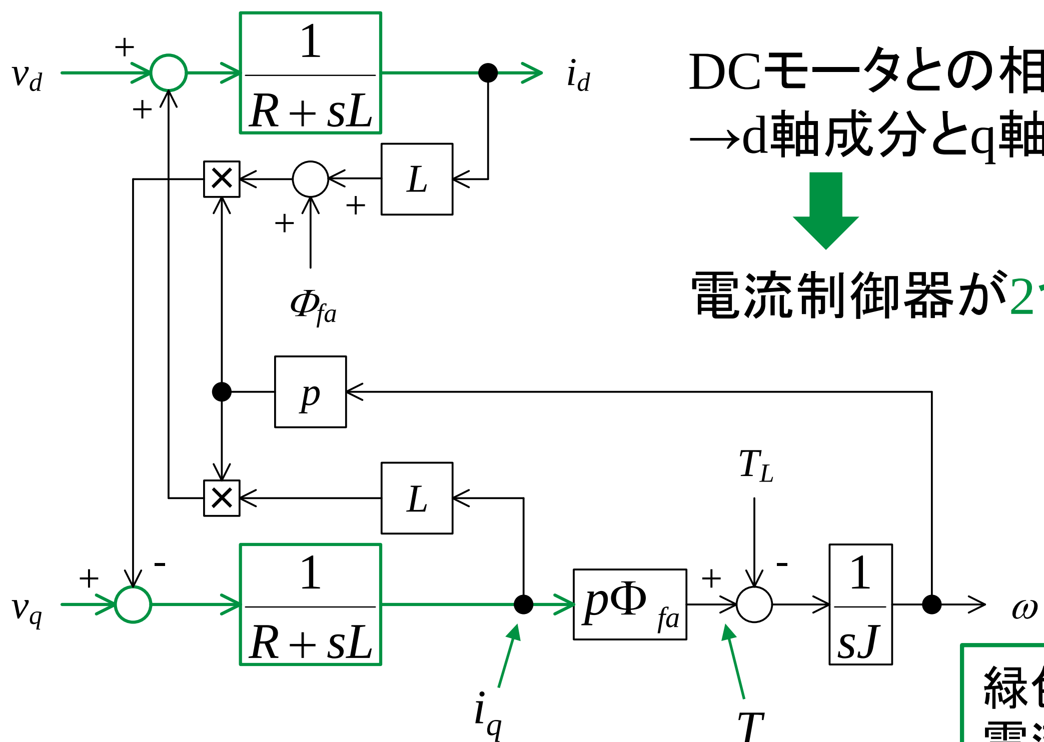
トルクの式

$$T = K_T I$$

電圧方程式を変形（電流の微分方程式）

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \frac{1}{L}\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} - \frac{1}{L}\begin{bmatrix} R & \omega_e L \\ -\omega_e L & R \end{bmatrix}\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} - \frac{1}{L}\begin{bmatrix} 0 \\ \omega_e \Phi_{fa} \end{bmatrix}$$

ラプラス変換してブロック線図に



DCモータとの相違点
→d軸成分とq軸成分の2つに分離

電流制御器が2つ必要

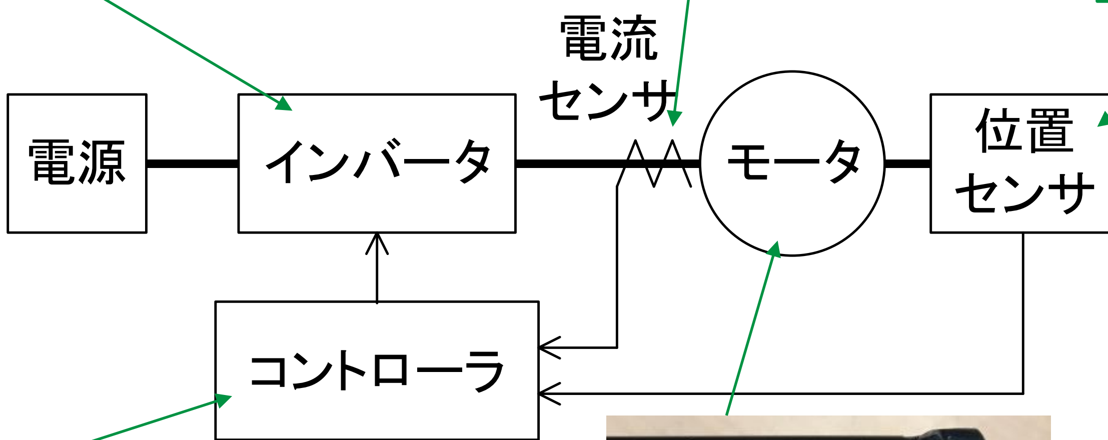
緑色のブロックだけに着目し、
電流制御系を設計

実際のシステム構成

PWM出力
出力電圧に制限

CT
シャント抵抗

エンコーダ
レゾルバ



マイコンで構成
離散制御

各部の特徴とベクトル制御に
関連する部分を紹介

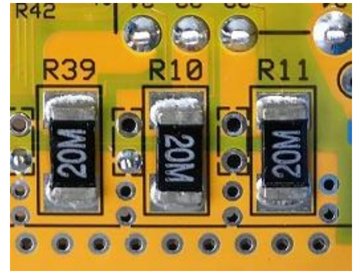
必要なパラメータの
記載なし

CT（間接検出）

磁束を検出し、電圧や電流に変換

電流出力タイプ（磁気平衡式）の方が高精度

シャント抵抗（直接検出）



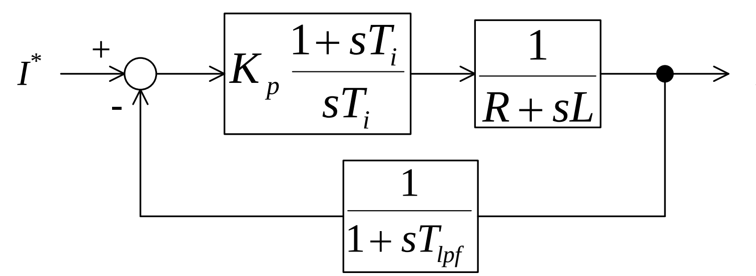
数mΩ～数Ω程度の無誘導性抵抗を主回路に直接挿入

mVオーダの電圧降下を検出

基板設計をうまくやらないとノイズの影響を受ける

理論と実際のギャップ

ノイズ対策用のフィルタやセンサの時定数とACRの時定数が近づくと電流の応答に影響



フィードバックに1次遅れ要素を含むシステム

位置センサ

インクリメンタルエンコーダ

1回転で数百～数百万の
パルスが出力（A相、B相）

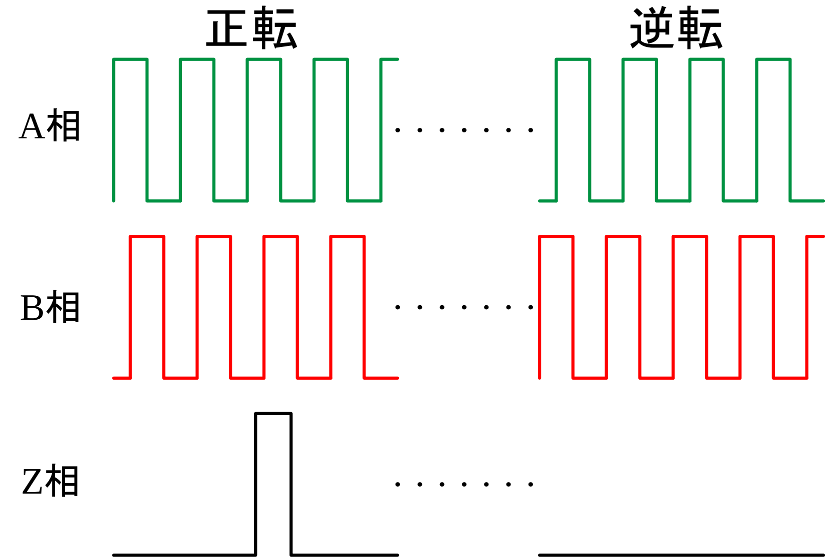
カウントし、位置・速度を計算

A相とB相は位相差90度

回転方向を検出

Z相は1回転で1パルスだけ出力

基準角度を決めるために使用



注意

Z相がついていないエンコーダはPMモータに適用不可
Z相パルスを1度検出しなければ位置が不明

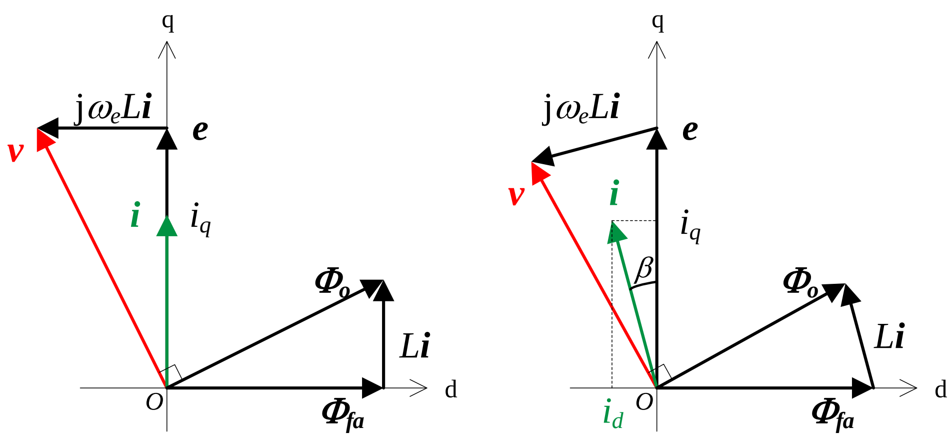
弱め磁束制御

速度増加→誘起電圧増加

※「弱め界磁制御」と呼ぶ人もいるが厳密には異なる

インバータ出力電圧には上限→一定速度以上は駆動不可能

少しでも速度を増加したい→弱め磁束制御



Id=0制御　弱め磁束制御

$$i_d = \frac{-\Phi_{fa} \pm \sqrt{\left(\frac{V_{\max}}{\omega_e}\right)^2 - \left(L_q i_q\right)^2}}{L_d}$$

$V_{\max}$: 制限したい電圧

負のd軸電流を流すことで、磁石磁束を弱める効果

誘起電圧の増加を抑制→より高速での駆動が可能

（注意）d軸電流を流しすぎると不可逆減磁を起こす

埋込磁石同期モータ(IPMモータ)の制御

電圧方程式

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R + \frac{d}{dt}\boxed{L_d} & \omega_e \boxed{L_q} \\ -\omega_e \boxed{L_d} & R + \frac{d}{dt}\boxed{L_q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_e \Phi_{fa} \end{bmatrix}$$

制御器の設計の仕方は
SPMモータと同じ

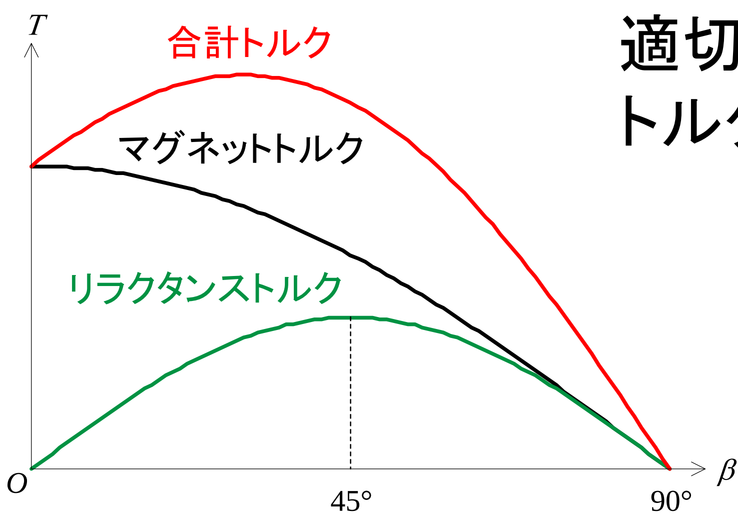
トルクの式

$$T = p\Phi_{fa} i_q + \underbrace{p(L_d - L_q) i_d i_q}_{\text{リラクタンストルク}}$$

➡ d軸電流がトルク発生に寄与

$$T = p\Phi_{fa} I \cos\beta + \frac{1}{2} p (L_d - L_q) I^2 \sin 2\beta$$

β: 誘起電圧ベクトルに対する電流ベクトルの進み角(電流進角)



適切なβにすることで、最小電流でトルクを出力(最大トルク/電流制御)

$$\beta = \sin^{-1}\left(\frac{-\Phi_{fa} + \sqrt{\Phi_{fa}^2 + 8(L_q - L_d)^2 I^2}}{4(L_q - L_d) I} \right)$$

$$i_d = \frac{\Phi_{fa}}{2(L_q - L_d)} - \sqrt{\frac{\Phi_{fa}^2}{4(L_q - L_d)^2} + i_q^2}$$

センサを使わずに電圧、電流から位置を推定する制御

誘起電圧方式

中高速向き

モータの数式モデルからオブザーバを構成し、
誘起電圧を推定することで位置を推定

高調波重畳方式

低速向き

高調波電圧を印加し、流れる高調波電流から、
位置を推定
インダクタンスの突極性を用いるため、SPMモータには
使えない方法