

## 付録7 同期機のセンサレスベクトル制御

### ○ 拡張誘起電圧モデルを利用した位置センサレスベクトル制御

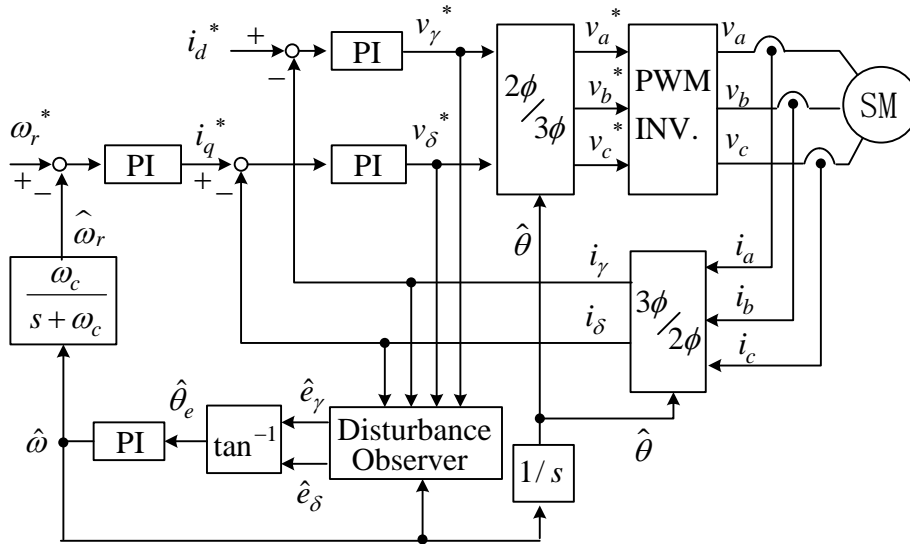


図 a7-1 同期電動機 (SM) のセンサレスベクトル制御系

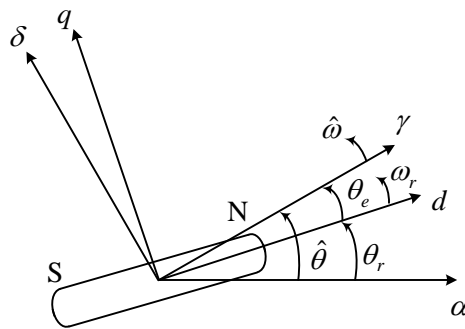


図 a7-2 座標系

多くの位置センサレスベクトル制御法が提案されているが、その中で構成が比較的簡単な**拡張誘起電圧モデル**を利用した位置速度推定法について述べる<sup>(33)(38)(39)</sup>。拡張誘起電圧を用いた同期機の $\gamma$ - $\delta$ 軸モデルは(a4-69)より次式で与えられる。

$$\begin{bmatrix} v_\gamma \\ v_\delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_d & -\omega_r L_q \\ \omega_r L_q & R_s + pL_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\gamma \\ i_\delta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_\gamma \\ e_\delta \end{bmatrix} \quad (\text{a7-1})$$

ここで、 $e_\gamma, e_\delta$  は次式で与えられる。

$$\begin{bmatrix} e_\gamma \\ e_\delta \end{bmatrix} = E_{ex} \begin{bmatrix} \sin \theta_e \\ \cos \theta_e \end{bmatrix} + (\hat{\omega} - \omega_r) L_d \begin{bmatrix} -i_\delta \\ i_\gamma \end{bmatrix} \quad (\text{a7-2})$$

拡張誘起電圧  $E_{ex}$  は次式で与えられる。

$$E_{ex} = \omega_r \left[ (L_d - L_q) i_d + \psi \right] - (L_d - L_q) p i_q \quad (\text{a7-3})$$

(a7-1)より,

$$e_\gamma = v_\gamma + \omega_r L_q i_\delta - (R_s + p L_d) i_\gamma \quad (\text{a7-4})$$

(a7-4)の微分を避けるため、ローパスフィルタを用い、 $e_\gamma$  を次式で演算する。 $v_\gamma$  ,  $\omega_r$  はそれぞれコントローラで使用できる  $v_\gamma^*$  ,  $\hat{\omega}$  に変更した。

$$\hat{e}_\gamma = \frac{g}{s+g} \left( v_\gamma^* + \hat{\omega} L_q i_\delta - (R_s + s L_d) i_\gamma \right) \quad (\text{a7-5})$$

同様に,

$$\hat{e}_\delta = \frac{g}{s+g} \left( v_\delta^* - \hat{\omega} L_q i_\gamma - (R_s + s L_d) i_\delta \right) \quad (\text{a7-6})$$

(a7-5), (a7-6)は**外乱オブザーバ**による推定となっている。

(a7-2)の第2項を無視し、 $\theta_e$  の推定値を  $\hat{\theta}_e$  として

$$\begin{bmatrix} \hat{e}_\gamma \\ \hat{e}_\delta \end{bmatrix} = \hat{E}_{ex} \begin{bmatrix} \sin \hat{\theta}_e \\ \cos \hat{\theta}_e \end{bmatrix} \quad (\text{a7-7})$$

が得られる。よって,

$$\hat{\theta}_e = \tan^{-1} \left[ \frac{\hat{e}_\gamma}{\hat{e}_\delta} \right] \quad (\text{a7-8})$$

が演算できる。 $-\pi < \hat{\theta}_e < \pi$  とする。

速度推定は  $\hat{\theta}_e$  を0にするようにPI制御器を用いて次式で行う。

$$\hat{\omega} = -\left( K_{ep} + \frac{K_{ei}}{s} \right) \hat{\theta}_e \quad (\text{a7-9})$$

磁極位置は

$$\hat{\theta} = \frac{1}{s} \hat{\omega} \quad (\text{a7-10})$$

で推定する。積分器はローパスフィルタの一種と考えられるので、後述の速度PI制御のように  $\hat{\omega}$  をローパスフィルタに通す必要はないであろう。 $0 < \hat{\theta}_e < \pi$  のとき、(a7-9)より  $\hat{\omega}$  は

小さくなるので（積分制御が働いているから  $\hat{\omega}$  と  $\hat{\theta}_e$  の符号は必ずしも一致せず、 $\hat{\omega}$  はもとの値から徐々に変化する）(a7-10)よりそれを積分した  $\hat{\theta}$  の増え方が緩慢になって  $\gamma$  軸が  $d$  軸に近づく。逆に、 $-\pi < \hat{\theta}_e < 0$  のとき、(a7-9)より  $\hat{\omega}$  は大きくなるので(a7-10)より  $\hat{\theta}$  の増え方が急になって  $\gamma$  軸が  $d$  軸に近づく。ここ結果、定常時には  $\gamma$  軸が  $d$  軸に一致するようになる。図 a7-3 に 位置・速度推定の近似ブロック図を示す。角度の誤差が 0 になるように PI 制御で速度（周波数）を変えるフィードバック制御系となっており、これは一般に PLL(phase locked loop)制御と呼ばれているものの一種である。

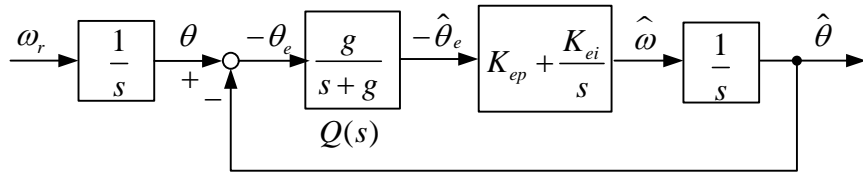


図 a7-3 位置・速度推定の近似ブロック図

近似の部分は  $\theta_e$  と  $\hat{\theta}_e$  の間の関係が単純に  $Q(s)$  だけで表わせないと考えられる点にある。

オブザーバの推定速度が十分速く、 $Q(s) = 1$  と仮定すると

$$\frac{\hat{\theta}}{\theta} = \frac{K_{ep}s + K_{ei}}{s^2 + K_{ep}s + K_{ei}} \quad (\text{a7-11})$$

分母  $= s^2 + K_{ep}s + K_{ei} = s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2$  とおいて

$$K_{ep} = 2\zeta\omega_n, \quad K_{ei} = \omega_n^2 \quad (\text{a7-12})$$

$\omega_n$  : 固有角周波数,  $\zeta$  : ダンピング係数

PI 速度制御においてはノイズの影響を減らすため、遮断周波数  $\omega_c$  のローパスフィルタをつける。

$$\hat{\omega}_r = \frac{\omega_c}{s + \omega_c} \hat{\omega} \quad (\text{a7-13})$$

以上、(a7-5), (a7-6), (a7-8), (a7-9), (a7-10), (a7-13)を用いて制御を行う。

### ○ 簡易位置センサレスベクトル制御

(a7-7)の演算を簡単化することが考えられる。 $\hat{\theta}_e$  が小さいと考えて

$$\sin \hat{\theta}_e \approx \hat{\theta}_e, \quad \cos \hat{\theta}_e = 1 \quad (\text{a7-14})$$

とし、(a7-7)より次式が得られる。

$$\hat{\theta}_e = \frac{\hat{e}_\gamma}{\hat{E}_{ex}} \quad (\text{a7-15})$$

(a7-3)の微分項を無視して次式で演算が可能となる。

$$\hat{\theta}_e = \frac{\hat{e}_\gamma}{\hat{\omega} \{ (L_d - L_q) i_\gamma + \psi \}} \quad (\text{a7-16})$$

$\hat{\theta}_e$ の代わりに $e_\gamma^*$ を零にすることで、磁極の角速度 $\hat{\omega}$ が推定できる。すなわち

$$\hat{\omega} = - \left( K_{ep} + \frac{K_{ei}}{s} \right) e_\gamma^* \quad (\text{a7-17})$$

$$\text{ただし, } K_{ep} = \text{sign}(\hat{\omega}) |K_{ep}|, K_{ei} = \text{sign}(\hat{\omega}) |K_{ei}| \quad (\text{a7-18})$$

逆転の場合には角速度 $\hat{\omega} < 0$ となるから、ゲインの符号を変えないといけない。一般に $(L_d - L_q) i_\gamma + \psi > 0$ である。図 a7-4 に簡易センサレスベクトル制御系 I<sup>(53)</sup>を示す。

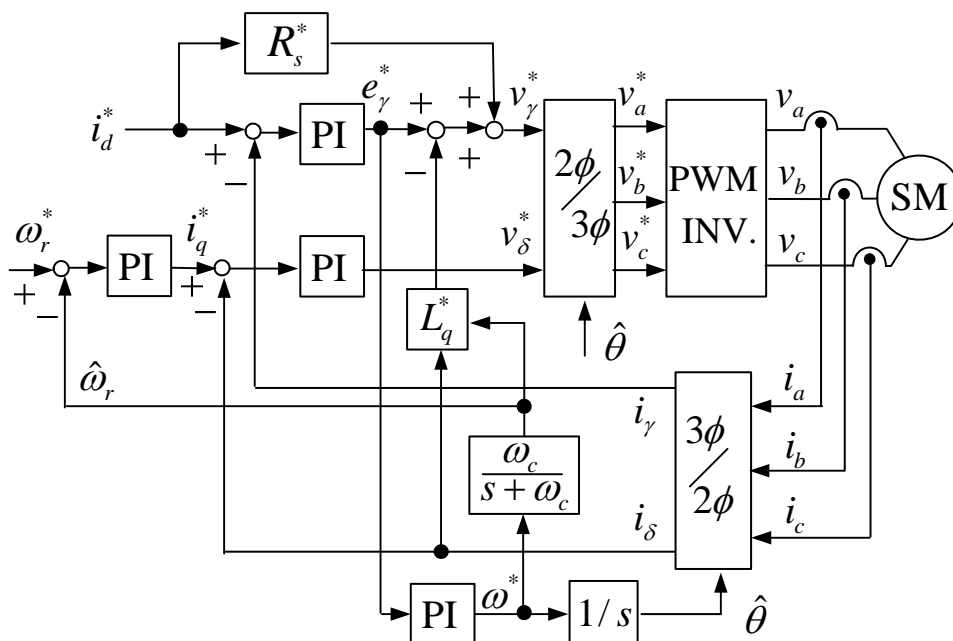


図 a7-4 簡易センサレスベクトル制御系 I

$e_\gamma^*$ は(a7-4)で、微分項 $p i_\gamma = 0$ とした次式の制御（一種の非干渉制御）を行うと $d$ 軸PI電流制御の出力より求まる。

$$v_\gamma^* = e_\gamma^* + R_s^* i_d^* - \hat{\omega}_r L_q^* i_\delta \quad (\text{a7-19})$$

$p i_\gamma = 0$  の仮定は、 $d$  軸 PI 電流制御により  $i_\gamma$  がほぼ一定に制御されるので、妥当な仮定と考えられる。

(a7-17)では、 $e_\gamma^*$  を PI 制御して磁極の角速度  $\hat{\omega}$  (推定速度) を求めたが、速度指令を  $e_\gamma^*$  の情報で補正して求めることもできる。図 a7-5 に簡易センサレスベクトル制御系 II を示す。図の  $\omega_d$  は、次式の関係があり指令速度と推定速度の偏差と考えられる。

$$\omega_d = \omega_r^* - \hat{\omega} \quad (\text{a7-20})$$

このとき、 $e_\gamma^*$  は指令速度と推定速度の偏差に比例することになるので、この偏差を積分制御して  $v_\delta^*$  を変えてトルク電流を変化させると速度制御が可能となる。 $v_\delta^*$  の演算は次式で行う。これはフィードフォワード的に必要な電圧を加えることを行っている。

$$v_\delta^* = (\psi + L_d i_d^*)(\omega_r^* + \omega_c) \quad (\text{a7-21})$$

$$\text{ただし、} \omega_c = \frac{K_{ie}}{s} e_\gamma^* \quad (\text{a7-22})$$

(a7-21) は Park の式(a4-37)で、 $q$  軸電圧の項で微分項と抵抗分を無視した式を利用した。

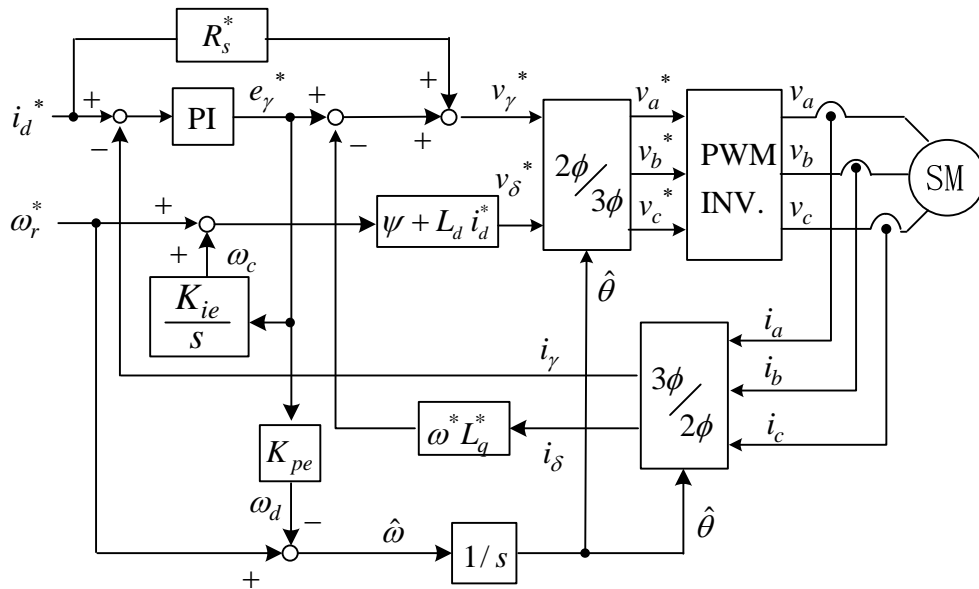


図 a7-5 簡易センサレスベクトル制御系 II