

Chapter3. 영구자석 동기 전동기 구동 시스템

전력전자연구실
<http://pel.ajou.ac.kr>

PMSM 구동 시스템

- 영구자석 동기 전동기의 센서리스 제어
 - 센서리스 기법을 사용하는 이유
 - 벡터제어를 하기 위해서는 회전자의 위치정보가 필수적으로 요구됨
 - 회전자의 위치 정보를 얻기 위해 엔코더나 레졸버 등의 센서류를 사용
 - 시스템의 가격상승의 원인
 - 사용환경에 민감한 특성으로 인하여 노이즈 등에 취약한 특성을 가짐
 - 센서류의 제약사항에 따라, 센서 없이 회전자의 위치정보를 얻을 수 있는 센서리스 기법이 활발하게 연구되고 있음
 - IPMSM 센서리스 기법의 종류
 - 비선형 관측기(Nonlinear Observer)
 - 축소차수 관측기(Reduced-Order Observer)
 - 전차원 관측기(Full-Order Observer)

PMSM 구동 시스템

■ 영구자석 동기 전동기의 센서리스 제어

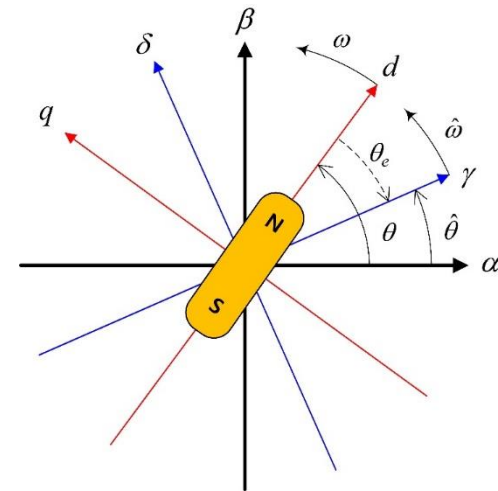
■ EEMF (Extended of Electro Motive Force) 기반 센서리스 운전

■ EEMF 기반 센서리스 알고리즘의 특징

- 회전자표계 내에서 EEMF를 사용하는 IPMSM의 수학적 모델링을 통해 회전각과 속도를 추정
- 최소차원 관측기를 사용하여 회전각과 속도를 추정하기 때문에 다른 센서리스 알고리즘에 비해 전체시스템이 간단함

■ IPMSM의 공간 벡터도

- $\alpha - \beta$: 정지좌표계의 좌표축
- $d - q$: 동기좌표계의 좌표축
- $\gamma - \delta$: 추정한 동기 좌표계 $d - q$ 축
- ω : $d - q$ 축의 각속도
- $\hat{\omega}$: $\gamma - \delta$ 축의 각속도
- θ_e : $d - q$ 축과 $\gamma - \delta$ 축 회전각의 차
- d 축은 모터의 N극과 일치



< IPMSM의 공간 벡터도 >

PMSM 구동 시스템

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \varepsilon_\gamma \\ \varepsilon_\delta \end{bmatrix} &= \omega \psi_a \begin{bmatrix} -\sin \theta_e \\ \cos \theta_e \end{bmatrix} + \mathbf{L}_a p \begin{bmatrix} i_\gamma \\ i_\delta \end{bmatrix} + \omega \mathbf{L}_b \begin{bmatrix} i_\gamma \\ i_\delta \end{bmatrix} \\ &\quad + (\dot{\omega} - \omega) \mathbf{L}_c \begin{bmatrix} i_\gamma \\ i_\delta \end{bmatrix} \\ \mathbf{L}_a &= \begin{bmatrix} -(L_d - L_q) \sin^2 \theta_e & (L_d - L_q) \sin \theta_e \cos \theta_e \\ (L_d - L_q) \sin \theta_e \cos \theta_e & (L_d - L_q) \sin^2 \theta_e \end{bmatrix} \\ \mathbf{L}_b &= \begin{bmatrix} -(L_d - L_q) \sin \theta_e \cos \theta_e & -(L_d - L_q) \sin^2 \theta_e \\ -(L_d - L_q) \sin^2 \theta_e & (L_d - L_q) \sin \theta_e \cos \theta_e \end{bmatrix} \\ \mathbf{L}_c &= \begin{bmatrix} (L_d - L_q) \sin \theta_e \cos \theta_e & -L_d \cos^2 \theta_e - L_q \sin^2 \theta_e \\ L_d \sin^2 \theta_e + L_q \cos^2 \theta_e & -(L_d - L_q) \sin \theta_e \cos \theta_e \end{bmatrix} \end{aligned}$$

■ 영구자석 동기 전동기의 센서리스 제어

■ EEMF (Extended of Electro Motive Force) 기반 센서리스 운전

■ IPMSM의 정지좌표계 전압 방정식

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a + p(L_0 + L_1 \cos 2\theta) & pL_1 \sin 2\theta \\ pL_1 \sin 2\theta & R_a + p(L_0 - L_1 \cos 2\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} + \omega \lambda_a \begin{bmatrix} -\sin \theta \\ \cos \theta \end{bmatrix}$$

$$L_0 = \frac{L_d + L_q}{2}, L_1 = \frac{L_d - L_q}{2}$$

■ θ 에 대한 동기좌표계로 변환

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a + pL_d & -\omega L_q \\ \omega L_d & R_a + pL_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega \lambda_a \end{bmatrix}$$

■ 센서리스 시스템에서는 회전각을 알 수 없기 때문에 $d-q$ 축 모델을 사용할 수 없음

- $d-q$ 축을 추정된 $\gamma-\delta$ 축의 수학적 모델링을 통하여 두 축의 차이인 θ_e 를 0으로 제어하여 모터의 속도와 회전각 추정

■ $d-q$ 축 좌표계에서 EEMF를 고려한 전압방정식

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a + pL_d & -\omega L_q \\ \omega L_q & R_a + pL_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ E_{ex} \end{bmatrix}$$

$$E_{ex} = \omega[(L_d - L_q)i_d + \lambda_a] - (L_d - L_q)(pi_q)$$

PMSM 구동 시스템

- 영구자석 동기 전동기의 센서리스 제어
 - EEMF (Extended of Electro Motive Force) 기반 센서리스 운전
 - $d - q$ 축 좌표계에서 θ_e 만큼 지연된 $\gamma - \delta$ 축 좌표계로 모델링

$$\begin{bmatrix} v_\gamma \\ v_\delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a + pL_d & -\omega L_q \\ -\omega L_q & R_a + pL_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\gamma \\ i_\delta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_\gamma \\ e_\delta \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} e_\gamma \\ e_\delta \end{bmatrix} = E_{ex} \begin{bmatrix} -\sin \theta_e \\ \cos \theta_e \end{bmatrix} + (\hat{\omega} - \omega) L_c \begin{bmatrix} i_\gamma \\ i_\delta \end{bmatrix}$$

- 회전자의 위치와 속도를 추정하기 위해 θ_e 를 포함하는 회전 좌표계상에서 EEMF 이용

PMSM 구동 시스템

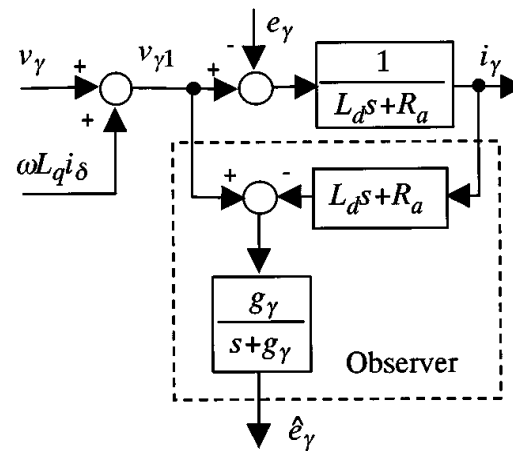
■ 영구자석 동기 전동기의 센서리스 제어

■ EEMF (Extended of Electro Motive Force) 기반 센서리스 운전

■ 최소차원 관측기를 이용한 EEMF 추정

- 최소차원 관측기를 통하여 e_γ 의 추정값 \hat{e}_γ 을 구할 수 있음
- e_δ 의 추정값 \hat{e}_δ 도 같은 방법으로 추정
- 실제 각속도 ω 를 추정 각속도 $\hat{\omega}$ 가 정확히 추정 시 정확한 EEMF 추정 가능

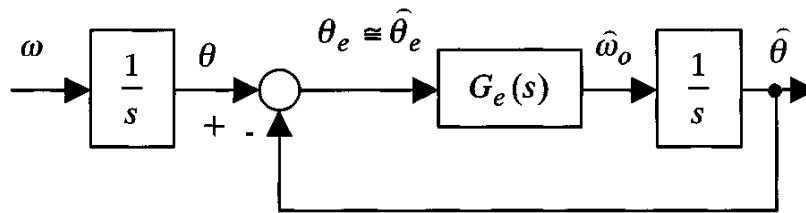
$$\begin{bmatrix} \hat{e}_\gamma \\ \hat{e}_\delta \end{bmatrix} = E_{ex} \begin{bmatrix} -\sin \hat{\theta}_e \\ \cos \hat{\theta}_e \end{bmatrix} \quad \hat{\theta}_e = \tan^{-1} \left(-\frac{\hat{e}_\gamma}{\hat{e}_\delta} \right)$$



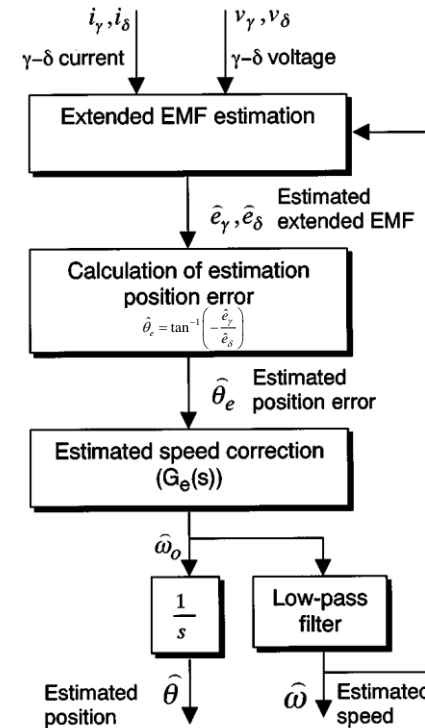
< 최소차원 관측기 블록도 >

PMSM 구동 시스템

- 영구자석 동기 전동기의 센서리스 제어
 - EEMF (Extended of Electro Motive Force) 기반 센서리스 운전
 - EEMF를 이용한 추정 위치 및 속도 추정
 - 각속도를 적분하여 얻은 회전각과 추정한 회전각의 오차를 PI제어기를 통해 0으로 제어



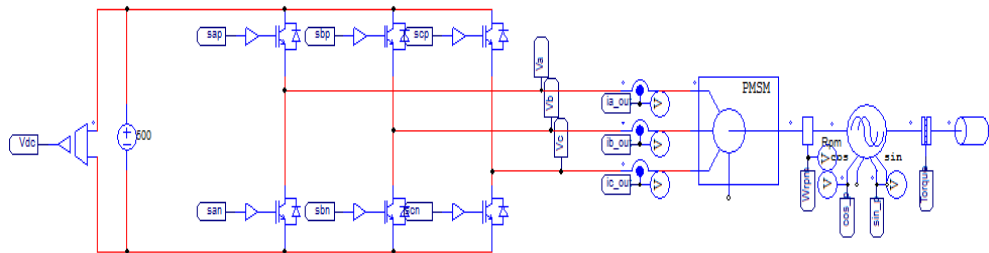
< 회전각과 각속도 제어 블록도 >



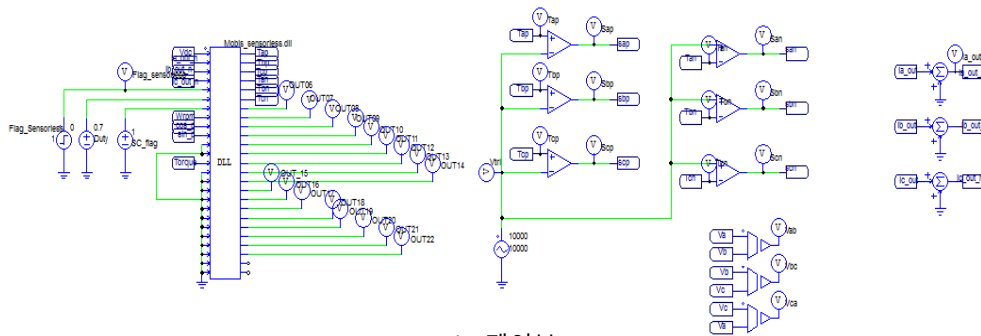
< 속도 및 위치 추정 알고리즘 블록도 >

PMSM 구동 시스템

- 영구자석 동기 전동기의 센서리스 제어
 - EEMF (Extended of Electro Motive Force) 기반 센서리스 운전
 - 회로도 및 파라미터
 - 입력전압 : 600[V], 삼각파 비교 전압 변조방식(SPWM)



(a) 3상 2레벨 인버터를 사용한 IPMSM의 회로도



(b) 제어부

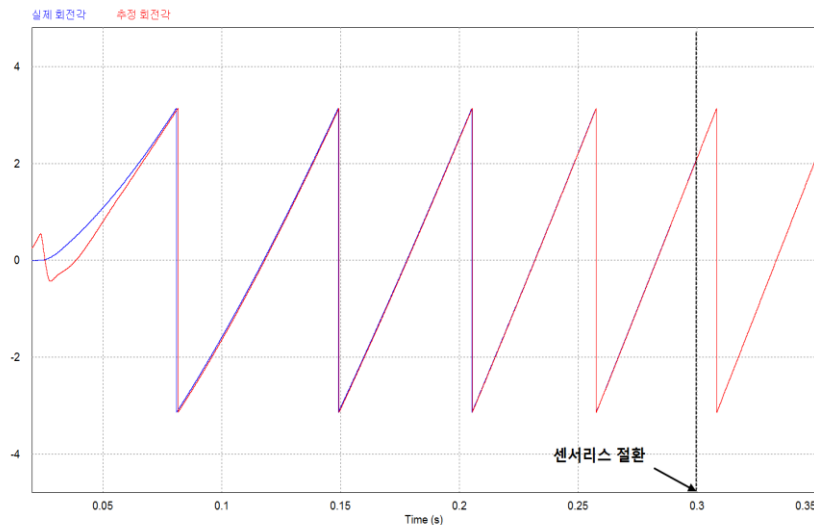
< PSIM 프로그램을 사용한 IPMSM의 회로도 구성 >

표 3.2 3상 2레벨 인버터를 사용한 IPMSM의 파라미터

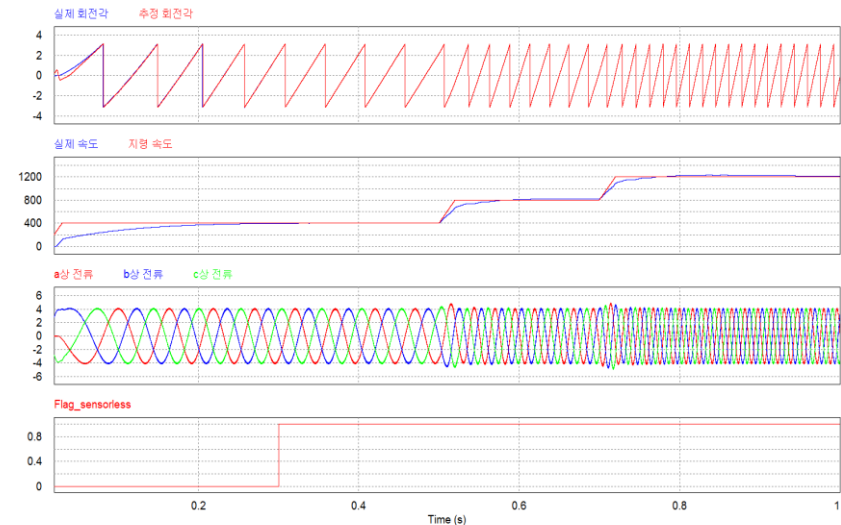
항목	값	단위
고정자 저항(R_s)	0.349	Ω
d축 인덕턴스(L_d)	13.17	mH
q축 인덕턴스(L_q)	15.60	mH
계자자속(flux)	0.554	Wb
극수(P)	6	-
스위칭 주파수(f_s)	10	kHz

PMSM 구동 시스템

- 영구자석 동기 전동기의 센서리스 제어
 - EEMF (Extended of Electro Motive Force) 기반 센서리스 운전
 - 시뮬레이션 결과파형
 - 속도 : 800→1200[rpm], 제어주기 : 100[μsec]



(a) 실제 회전각과 추정회전각



(b) EEMF기반 센서리스 알고리즘을 통한 IPMSM의 속도제어

< IPMSM의 시뮬레이션 파형 >