

전동 과급기용 초고속 SPMSM 전류모델기반 센서리스 제어 시뮬레이션

이태영^{***}, 권민관^{***}, 안호균^{**}, 안민혁^{*}, 이기창^{*}
 한국전기연구원 전기추진연구본부*, 창원대학교 전기공학과^{**}

Currnet Model-Based Sensorless Control Simulation of Ultra-high-speed Motor for Electric Turbo Charger

Tae-Young Lee^{***}, Min-Gwan Gwon^{***}, Ho-Gyun Ahn^{**}, Min-Hyuk An^{*}, Ki-Chang Lee^{*}
 Korea Electrotechnology Research Institute*, Changwon National University^{**}

ABSTRACT

기후변화 규제에 대응하기 위해 자동차 산업에서는 엔진의 배기가스는 줄이고, 출력은 향상시키는 과급기를 필요로 한다. 전동식 과급기에 필요한 압축기는 초고속의 모터회전이 필요하고, 압축기 전기모터의 속도, 회전자의 위치 추정을 위해서는 센서가 필요하다. 하지만 센서의 사용은 비용의 증가, 신뢰도저하 등과 같은 문제점들이 있고, 이러한 문제점들을 해결하기 위해 여러 센서리스 방식들이 사용되고 있다. 본 논문에서는 PSIM 시뮬레이터를 이용하여 전류모델 기반의 센서리스 방식으로 동기전동기(SPMSM)를 구동하는 0.8초 내로 90000rpm의 속도까지 도달하도록 시뮬레이션을 구현하였다.

1.서론

점점 심해지는 기후변화에 대응하기 위해 자동차 산업에서는 엔진의 배기가스는 줄이고 출력을 향상시키는 과급기를 필요로 한다. 기계식 구동 과급기와 달리 전동식 과급기에서는 터보랙을 제거하기 위해 전기모터로 구동되는 압축기가 추가되고, 이 압축기의 전기모터는 70,000~80,000rpm에 준하는 초고속의 회전이 필요로 한다. 또한 전동식 과급기는 터보랙과 같은 엔진 응답 지연 현상을 개선하기 위해서 빠른 응답성을 요구하므로 0.8초 내에 90,000rpm에 안정적으로 도달하도록 PSIM 시뮬레이터를 이용하여 알고리즘을 구현하였다.

2.본문

2.1 전류 모델 기반 센서리스 제어 기법

SPMSM의 위치를 추정하기 위해 제어기 위에서는 d-q축 전압 방정식이 필요하지만 센서리스제어 시에는 실제의 d-q축을 알 수 없으므로 본래의 d-q축에 대해서 임의의 γ, δ 축을 두어 SPMSM과 같은 임의의 모델식을 만들게 된다. γ, δ 축은 d,q축과는 $\Delta\theta$ 의 각도 오차가 있다고 가정하고 $\Delta\theta$ 를 0에 수렴시켜야 회전자 위치정보를 알 수 있다. γ, δ 축상에서의 전압 방정식은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} v_\gamma \\ v_\delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + L_d p & -\omega_M L_q \\ \omega_M L_d & R_s + L_q p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\gamma \\ i_\delta \end{bmatrix} + e \begin{bmatrix} -\sin\Delta\theta \\ \cos\Delta\theta \end{bmatrix} \quad (1)$$

v_γ : γ 축 전압
 v_δ : δ 축 전압
 R_s : 고정자 저항
 ω_M : 회전자 각속도
 L_d : d축 인덕턴스
 L_q : q축 인덕턴스
 $\Delta\theta$: $\gamma - \delta$ 축, d-q축 각도차
 e : 역기전력

n을 샘플링수, T를 샘플주기로 할 때

$$\frac{di}{dt} = \frac{i(n) - i(n-1)}{T} \quad (2)$$

을 이용하여 식 (3)과 같은 차분방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} i_\gamma(n) \\ i_\delta(n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - \frac{R_s}{L_d} T & \omega_M \frac{L_q}{L_d} T \\ -\omega_M \frac{L_d}{L_q} T & 1 - \frac{R_s}{L_q} T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\gamma(n-1) \\ i_\delta(n-1) \end{bmatrix} + \frac{T}{L_d L_q} \begin{bmatrix} L_q v_\gamma(n-1) \\ L_d v_\delta(n-1) \end{bmatrix} + \frac{T}{L_d L_q} e \begin{bmatrix} L_q \sin\Delta\theta \\ -L_d \cos\Delta\theta \end{bmatrix} \quad (3)$$

이상적인 상황을 가정하면 $\Delta\theta = 0$, $e = e_M = K_E \omega_M$ 이라 놓을 수 있고, 아래의 결과를 얻을 수 있다. 이때 K_E 는 역기전력 상수이다.

$$\begin{bmatrix} i_{M\gamma}(n) \\ i_{M\delta}(n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - \frac{R_s}{L_d} T & \omega_M \frac{L_q}{L_d} T \\ -\omega_M \frac{L_d}{L_q} T & 1 - \frac{R_s}{L_q} T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\gamma(n-1) \\ i_\delta(n-1) \end{bmatrix} + \frac{T}{L_d L_q} \begin{bmatrix} L_q v_\gamma(n-1) \\ L_d v_\delta(n-1) \end{bmatrix} + \frac{T}{L_d L_q} e_M \begin{bmatrix} 0 \\ -L_d \end{bmatrix} \quad (4)$$

두 식 (3),(4)의 차를 이용하면,

$$\begin{bmatrix} \Delta i_\gamma(n) \\ \Delta i_\delta(n) \end{bmatrix} = \frac{T}{L_d L_q} \begin{bmatrix} L_q e \sin\Delta\theta \\ L_d (e_M - e \cos\Delta\theta) \end{bmatrix} = \frac{T}{L_d L_q} \begin{bmatrix} L_q e \Delta\theta \\ -L_d \Delta e \end{bmatrix} \quad (5)$$

i_γ 축의 오차는 $\Delta\theta$, 위치오차에 비례하고, i_δ 축의 오차는 Δe , 기전력 오차에 비례하는 것을 알 수 있다. 이 결과를 이용하여 아래와 같이 속도추정 알고리즘을 이끌어 낼 수 있다.

$$e_M(n) = e_M(n-1) - K_c \Delta i_\delta(n) \quad (6)$$

$$\theta_M(n) = \theta_M(n-1) + \frac{T}{K_E} e_M(n) + K_\theta \Delta i_\gamma(n) \quad (7)$$

K_e : 역기전력 추정 이득

K_θ : 회전자 위치 추정 이득

2.2 PSIM을 이용한 전동기 시뮬레이션 회로

전동기 제어를 위한 시뮬레이션은 PSIM 프로그램을 이용하여 전동기와 제어기 회로를 구성하였고, PSIM 프로그램의 C source 블록을 사용하여 실제 DSP 구동과 유사하게 C언어를 사용하여 구성하였다.

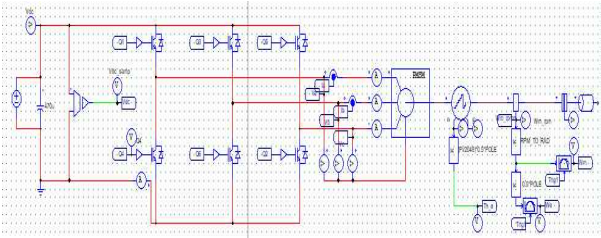


그림 1 SPMSM 회로

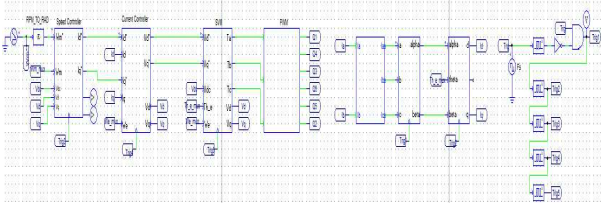


그림2. 전동기 구동을 위한 제어기, PIM 회로

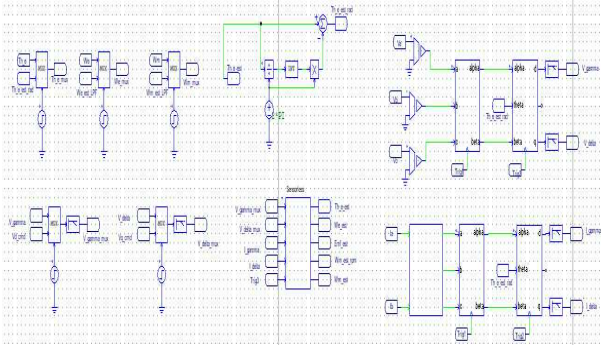


그림 3. 센서리스 구동을 위한 제어 알고리즘

표 1 전동기 제정수값

R_s	0.00384	L_d	0.000008
L_q	0.000008	K_E	0.00199
V_{pk}/K_rpm	0.360959	J_m	0.0001508
$Pole$	2	f_s	20Khz
K_e	0.0001	K_θ	0.001

3. 시뮬레이션 결과

2장에서 기술한 전동기의 파라미터와 알고리즘을 사용하여 전동기 지령속도 90,000rpm까지 0.8초 동안 가속시키면서 0.1초에 센서리스 알고리즘으로 전환시켜 시뮬레이션을 진행하였을

때 결과는 아래와 같다. 전동기 사양은 정격출력 3KW, 부하 형태는 팬부하 이고, 스위칭 주파수는 20KHz, 전류 제어기 주기는 50us, 속도 제어기 주기는 1ms 이다. 역기전력 추정이득과 회전자위치추정 이득 값은 실험값이고, 전압과 전류의 리플을 제거하기 위해 Low-Pass-Filter를 사용했다.

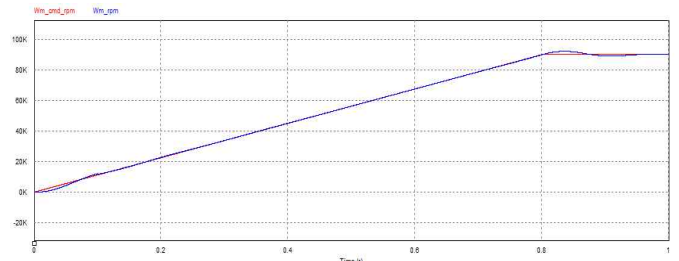


그림4. 지령속도와 전동기 속도 결과 파형

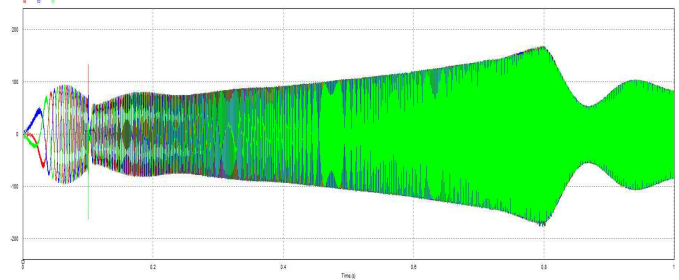


그림5. 상전류

3. 결론

본 논문에서는 전류 모델 기반 센서리스 제어 알고리즘을 이론적으로 분석하고, PSIM 프로그램을 이용하여 구성한 다음 시뮬레이션 하여 이론의 타당성을 검증하였다. 초기 구동에서는 역기전력이 부족하여 속도 추정이 어렵지만 일정속도 이상에서는 적절한 이득값을 통해 고속영역까지 속도 제어가 가능하다는 장점이 있다. 추후 결과를 바탕으로 DSP를 기반으로 하는 하드웨어를 구성하여 실험함으로써 알고리즘의 타당성을 검증할 것이다.

참고 문헌

- [1] R. Mizutani, T. Takeshita and N. Matsui, "Current model-based sensorless drives of salient-pole PMSM at low speed and standstill," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 34, no. 4, pp. 841-846, July-Aug. 1998
- [2] 이정효, 유재성, 공태용, 이원철, 원충연. 「200711역기전력 추정기를 이용한 전류 모델 기반의 SPMSM 센서리스 벡터제어」