

유도 전동기와 매입형 영구자석 동기 전동기의 센서리스 운전 특성 비교 및 분석

정일우*, 최원식*, 김민재*, 박기현**, 박현철*
 포항공과대학교*, 포항가속기연구소**

Analysis and Comparison of Sensorless Operation Characteristics of Induction Motor and Interior Permanent Magnet Synchronous Motor

Il-Woo Jeong*, Won-Shik Choi*, Min-Jae Kim*, Ki-Hyeon Park**, Hyun-Chul Park*
 Pohang University of Science and Technology(POSTECH)*, Pohang Accelerator Laboratory(PAL)**

Abstract - 본 논문에서는 유도 전동기와 매입형 영구자석 동기 전동기(IPMSM)의 센서리스 운전 성능의 비교 및 분석에 대해 기술하였다. 유도 전동기는 자속을 추정하여 회전자 위치를 얻는 두 가지 방식의 알고리즘을 기술하였고, 매입형 영구자석 동기 전동기는 역기전력을 추정하여 회전자 위치를 얻는 방식을 기술하였다.

1. 서 론

유도 전동기는 튼튼하며, 저가이고, 구조적으로 단순하여 제작이 용이하다는 장점으로 인해 산업 현장에서 많이 사용되고 있다. 하지만 효율, 속응성, 출력 밀도, 역률 등의 특성이 떨어지는 단점이 있다. 매입형 영구자석 동기전동기는 고속운전에 유리하며, 단위 체적당 출력 토크와 효율이 높은 장점으로 인해 최근 많은 주목을 받고 있다.

전동기의 제어에는 보통 벡터제어가 적용된다. 벡터제어를 통해 빠른 동적 응답과 정밀한 속도 및 토크 제어가 가능하다. 벡터제어를 위해서는 전동기의 정확한 회전자 위치가 필수적이다. 이를 위해 레졸버나 엔코더 등의 위치 검출기가 사용되는데, 하드웨어의 복잡성, 가격 상승, 전동기 축 방향 길이 증가, 열악한 환경에서 사용이 어려움, 제어의 신뢰성, 센서의 유지 및 점검, 노이즈에 취약함 등의 문제들이 발생한다. 그래서 센서를 사용하지 않고 전동기의 회전자의 위치를 계산할 수 있는 센서리스 제어에 대한 연구가 진행되어왔다.

본 논문에서는 양방향 전력변환기를 사용하여 전 속도 범위에서 3가지의 센서리스 알고리즘을 구현하여 연구를 진행했다. 유도 전동기의 경우 회전자와 고정자의 전압방정식을 통하여 자속을 추정하는 방식[1], 유도 전동기의 상태 방정식을 바탕으로 설계한 상태 관측기를 사용하는 방식[2]을 구현했고, 동기전동기의 경우 역기전력을 사용하는 방식[3]을 구현했다.

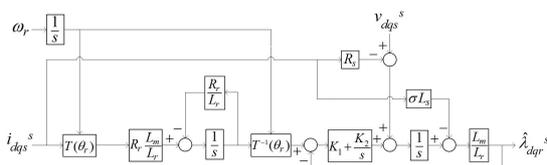
2. 본 론

2.1 유도 전동기의 센서리스 제어

위에서 언급한 것처럼, 속도 및 위치 검출기를 사용하는 경우 경제적, 기술적 측면에서 다양한 문제가 발생할 수 있다. 고정자와 회전자의 전압 방정식을 이용하는 방식, 적용 제어 방법, 상태 계환 추정 방법, 비선형 제어, 칼만 필터, 지능 제어 등 다양한 센서리스 방식이 연구되어져 왔다. 다양한 센서리스 알고리즘 중, 고정자와 회전자의 전압 방정식을 사용하시는 방식과 적응 속도 관측기를 사용하는 방식이 구현상의 간단함과 전 속도 영역에서 안정적인 성능을 나타내는 장점이 있다.

2.1.1 전압, 전류 모델 기반 센서리스

전압 모델은 고정자 전압 방정식을 이용하여 먼저 고정자 쇄교 자속을 구하고, 이로부터 회전자 쇄교 자속을 구하는 방법이다. 기본적으로 전동기의 역기전력의 적분을 통해 자속을 얻는다. 따라서 역기전력이 큰 고속 운전 영역에서는 비교적 정확한 값을 얻을 수 있다. 하지만 저속 운전 영역에서는 역기전력이 작기 때문에 정확히 자속을 추정하기 힘들어진다. 전류 모델은 회전자 전압 방정식을 바탕으로 회전 속도와 고정자 전류를 사용해서 회전자 쇄교 자속을 구하는 방법이다. 전류 모델은 고속에서 추정값이 진동하기 때문에 저속 운전 영역에 유리하다.



〈그림 1〉 전압 전류 모델을 혼합한 자속 추정 회로

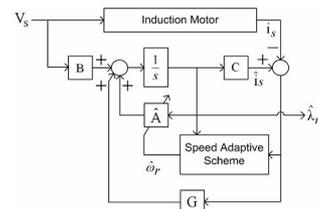
전압 모델과 전류 모델을 적절히 혼합하여 그림 1과 같이 전 속도 영역에서 우수한 회전 속도 추정 성능을 가지는 자속 추정회로를 구성하였다.

$$\lambda_{dqr}^s = \frac{s^2}{s^2 + K_p s + K_i} \lambda_{dqr}^s(VM) + \frac{K_p s + K_i}{s^2 + K_p s + K_i} \lambda_{dqr}^s(CM)$$

자속 추정 회로의 전달함수는 위 식과 같다. 전압 모델로 구한 자속에는 2차 고역 통과 필터를, 전류 모델로 구한 자속에는 2차 저역 통과 필터를 거친 형태로 분리할 수 있다. 따라서, 저속에서는 전류 모델로부터 자속이 선정되고 고속에서는 전압 모델로부터 자속이 선정됨을 알 수 있다.

2.1.2 상태 관측기 기반 센서리스

유도 전동기의 상태 방정식을 바탕으로 적절한 이득 행렬을 가지는 그림 2와 같은 상태 관측기를 구성하면 복잡한 계산 없이 유도 전동기의 회전 속도를 수월하게 추정할 수 있다.



〈그림 2〉 적응 상태 관측기를 통한 자속 추정 회로

상태 관측기를 구성하는 행렬은 아래 식과 같이 구성된다.

$$\begin{aligned} \sigma &= 1 - (L_m^2 / L_s L_r), \tau_r = L_r / R_r \\ A_{11} &= -\{R_s / \sigma L_s + (1 - \sigma) / \sigma \tau_r\} I = a_{r11} I \\ A_{12} &= L_m / \sigma L_s L_r \{(1 / \tau_r) I - \omega_r\} J = a_{12} I + a_{112} J \\ A_{21} &= (L_m / \tau_r) I = a_{r21} I, A_{22} = -(1 / \tau_r) I + \omega_r J = a_{r22} I + a_{222} J \\ B &= (1 / \sigma L_s) I = b I, C = [I \ 0], I = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, J = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \\ G &= \begin{bmatrix} g_1 & g_2 & g_3 & g_4 \\ -g_2 & g_1 & -g_4 & g_3 \end{bmatrix}^T, c = \sigma L_s L_r / L_m \\ g_1 &= (k - 1)(a_{r11} + a_{r11}), g_2 = (k - 1)a_{r11} \\ g_3 &= (k^2 - 1)(ca_{r11} + a_{r21}) - c(k - 1)(a_{r11} + a_{r22}) \\ g_4 &= -c(k - 1)a_{222} \end{aligned}$$

관측기를 통해 추정된 쇄교 자속을 사용하여 아래 식과 같은 PI 제어를 통해 회전 속도를 계산한다.

$$\hat{\omega}_r = K_p (e_{ids} \hat{\lambda}_{qr}^s - e_{iqs} \hat{\lambda}_{dr}^s) + K_i \int_0^t (e_{ids} \hat{\lambda}_{qr}^s - e_{iqs} \hat{\lambda}_{dr}^s) dt$$

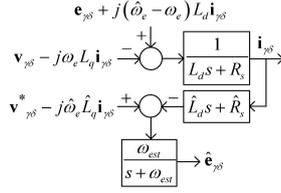
2.2 동기 전동기의 센서리스 제어

매입형 영구자석 동기전동기의 센서리스 제어 방법 중 가장 일반적인 방식은 역기전력을 이용하는 것이다. 역기전력은 회전자의 위치와 속도에 따라 변하기 때문에 이를 이용하면 추가적인 고주파 신호 주입 없이 빠르고 정확한 응답특성을 얻을 수 있다. 센서리스 제어 시에는 정확한 회전자의 위치를 알 수 없기 때문에 실제의 d-q축이 아닌 가상의 γ - δ 축을 설정하여 제어를 수행한다. d-q축과 γ - δ 축과의 위치 차이 $\Delta\theta_e$ 의 값을 안정적이면서 빠르게 0으로 만드는 것이 센서리스 제어의 관건이라 할 수 있다. γ - δ 축 지령 전압 $v_{\gamma\delta}^*$, 전류 $i_{\gamma\delta}^*$, 추정된 속도 $\hat{\omega}_e$ 와 전동

기의 수학적 모델을 이용하여 γ - δ 축 역기전력($e_{\gamma\delta}$)을 추정한다. 그리고 $e_{\gamma\delta}$ 와 계산을 통해 얻은 위치 차이의 추정 값 $\Delta\theta_e$ 를 이용해 속도와 위치를 추정($\hat{\omega}_e, \hat{\theta}_e$)한다.

2.1.2 역기전력 기반 센서리스

본 논문에서는 최소 자승 관측기를 사용하여 역기전력을 추정하고 PLL 형태의 속도 위치 추정기를 사용한다.



<그림 3> 최소 자승 관측기를 이용한 역기전력 추정 회로

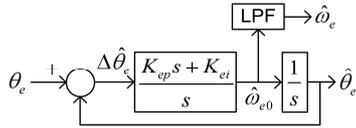
그림 3과 같은 형태의 역기전력 추정기는 아래 식과 같이 저역 통과 필터와 고역 통과 필터를 동시에 사용한 것과 같고, 결과적으로 회전자의 위치 오차를 얻는다.

$$\hat{e}_{\gamma\delta} = (v^{*\gamma} - j\hat{\omega}_e \hat{L}_d i_{\gamma\delta} - \hat{L}_d i_{\gamma\delta} s - \hat{R}_s i_{\gamma\delta}) \left(\frac{\omega_{est}}{s + \omega_{est}} \right)$$

$$\hat{e}_{\delta\gamma} = (v^{*\delta} - j\hat{\omega}_e \hat{L}_d i_{\delta\gamma} - \hat{L}_d i_{\delta\gamma} s) \left(\frac{\omega_{est}}{s + \omega_{est}} \right) - (\omega_{est} \hat{L}_d i_{\gamma\delta}) \left(\frac{s}{s + \omega_{est}} \right)$$

$$\Delta\hat{\theta}_e = -\tan^{-1} \left(\frac{\hat{e}_{\gamma\delta}}{\hat{e}_{\delta\gamma}} \right)$$

회전자의 위치 오차를 0으로 만들고 이를 통해 회전자 위치와 속도 정보를 추정하는 그림 4와 같은 PLL 형태의 속도, 위치 추정 회로를 사용한다.



<그림 4> PLL 형태의 속도, 위치 추정 회로

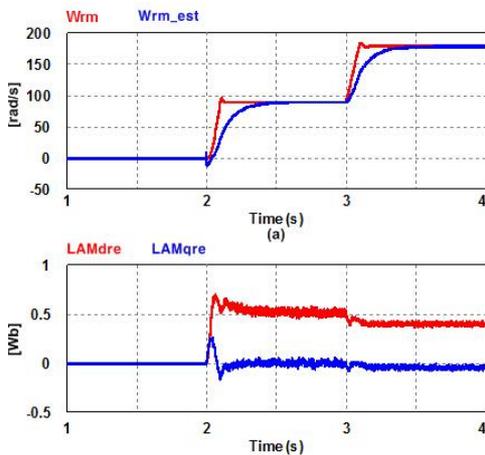
2.3 모의실험

유도 전동기와 매입형 영구자석 동기전동기의 센서리스 성능을 확인하기 위해 PSIM을 사용하여 모의실험을 수행했다.

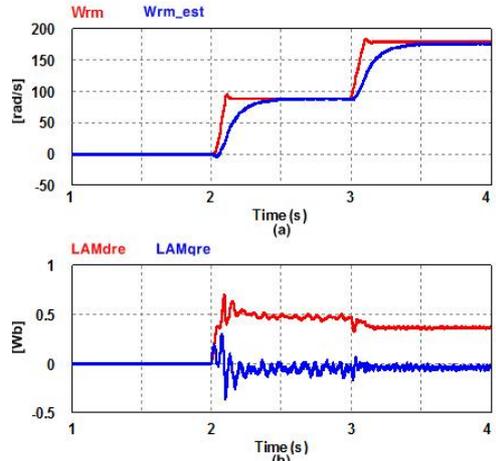
그림 5는 전압, 전류 모델을 혼합한 자속 추정 회로에 의해 추정된 유도 전동기의 회전 속도와 자속을 보여주고 있다. Settling time 약 0.5sec, 정상상태 오차는 1rad/s 이내 임을 확인할 수 있다.

그림 6은 적응 상태 관측기에 의해 추정된 유도 전동기의 회전 속도와 자속을 보여주고 있다. Settling time 약 0.5sec, 정상상태 오차는 5rad/s 이내 임을 확인할 수 있다. 전압, 전류 모델을 혼합한 자속 추정 회로와 비교해서 추정된 자속의 리플이 큰 것을 알 수 있다.

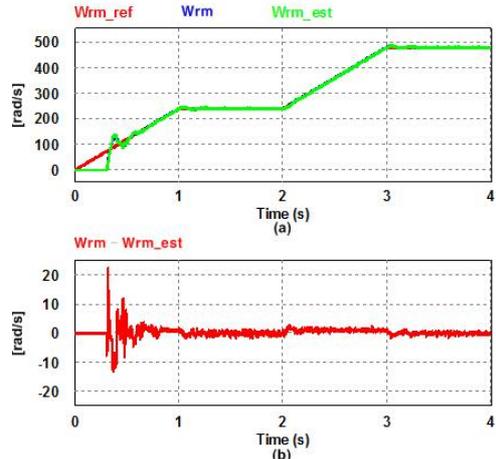
그림 7은 역기전력을 기반으로 추정한 매입형 영구자석 동기전동기의 회전 속도와 그 오차를 보여준다. 초기 운전시 약 20rad/s 이내의 오차가 발생하고, 이후 정상상태에서는 2rad/s 이내의 오차가 나타난다.



<그림 5> (a)실제 속도, 추정 속도 (b)D-Q축 자속



<그림 6> (a)실제 속도, 추정 속도 (b)D-Q축 자속



<그림 7> (a)지령 속도, 실제 속도, 추정 속도 (b)속도 오차

<표 1> 유도 전동기 및 매입형 영구자석 동기 전동기 파라미터

구분	파라미터	값	파라미터	값
유도 전동기	용량	2.2[kW]	rated speed	1750[r/min]
	pole pair	4	Rs	2.26[Ω]
	Rr	1.21[Ω]	Ls	11.18[mH]
	Lr	11.18[mH]	Lm	10.5[mH]
IPMSM	용량	3[kW]	rated speed	4500[r/min]
	pole pair	6	Rs	0.34[Ω]
	Ld	2.48[mH]	Lq	5.22[mH]

3. 결 론

유도 전동기와 매입형 영구자석 동기전동기는 산업 현장에서 다양하게 활용되고 있다. 센서리스 제어를 통해 가격을 낮추면서 제어의 신뢰성을 확보할 수 있다. 본 논문에서는 전압, 전류모델을 혼합한 회로와 상태 관측기를 사용한 회로를 통해 유도 전동기의 자속과 속도를 추정했고, 역기전력 추정을 통해 매입형 영구자석 동기 전동기의 속도를 추정했다. 구현한 센서리스 알고리즘을 통해 저속부터 정격속도까지 만족스러운 성능을 확인했다.

[참 고 문 헌]

[1] P. L. Jansen and R. D. Lorenz, "A physically insightful approach to the design and accuracy of flux observers for field oriented induction machine drives", IEEE Trans. on Ind. Appl., vol.30, no.1, pp.101-110, 1994

[2] H. Kubota and etc, "DSP-Based Adaptive Flux Observer of Induction Motor", IEEE Trans. on Ind. Appl., vol.29, no.1, pp.175-180, 1993

[3] Kwang-Woon Lee and Jung-Ik Ha, "Evaluation of Back-EMF Estimators for Sensorless Control of Permanent Magnet Synchronous Motors", Journal of Power Electronics, Vol.12 No.4, pp.604-614, 2012