

진화전략을 이용한 PMSM의 노이즈 저감 센서리스 속도제어

이동희, 손문경, 권영안
부산대학교 전기공학과

Speed Sensorless Control of PMSM for Noise Rejection Using Evolution Strategy

D.H.Lee, M.K.Son and Y. A. Kwon

Pusan National University, email: yakwon@hyowon.oc.pusan.ac.kr

Abstract - Most of sensorless algorithm are based on motor equations where it is necessary to find the phase voltage and current. However, measurement error and environmental noise deteriorate the accuracy of speed estimation of PMSM. This paper investigates speed sensorless control of PMSM for noise rejection in harsh environment. The proposed algorithm is based on the interaction between electrical parameter and random noise. The evolution strategy is used for minimizing the noise effect. The proposed algorithm is verified through simulation and experiment.

단, $K_E = \sqrt{\frac{3}{2}} MI_f$, $\omega_r = \frac{d\theta_r}{dt}$
토크 방정식은 다음과 같다.

$$T = PK_E i_{qs} \tag{2}$$

단, P는 쌍극수

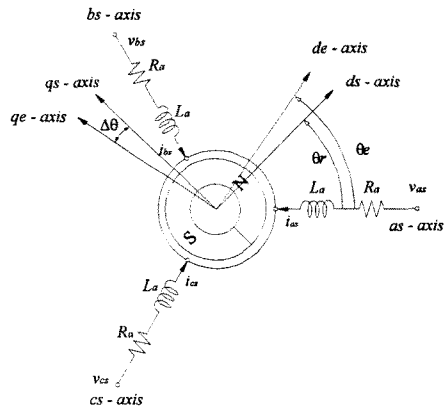


그림 1. PMSM의 모델

1. 서 론

영구자석 동기전동기는 높은 전력밀도와 제어정도로 인하여 많은 산업현장과 가전기기에 광범위하게 응용되고 있으며 최근에는 위치 및 속도센서를 사용하지 않는 센서리스 제어의 연구가 많이 이루어지고 있다.[1,2] 대부분의 센서리스 알고리즘은 상전압 및 전류를 이용하여 관련 방정식으로부터 위치 및 속도를 추정하는 방식이다. 그러나 불규칙 노이즈를 포함하는 측정오차는 영구자석 동기전동기의 속도추정의 정도를 감소시킨다.

본 논문은 영구자석 동기전동기의 위치 및 속도센서 없는 센서리스 제어에 관한 연구로서 측정전류에서 발생하는 노이즈의 영향을 저감하는 센서리스 속도제어 구현을 목적으로 한다. 본 논문에서 제시하는 제어방식은 측정전류 노이즈에 대한 추정속도의 영향을 각 파라미터에 대하여 분석하고 추정속도의 맥동에 영향을 크게 미치는 파라미터를 추정속도의 맥동이 감소하도록 설정하는 방식이다. 노이즈의 영향을 최소화하는 파라미터의 설정은 진화전략탐색을 이용하여 최적화 하였다. 본 제어방식은 시뮬레이션과 실험을 통하여 그 타당성을 입증한다.

2. PMSM의 수학적 모델

그림 1과 같은 PMSM에서 영구자석을 일정전류가 흐르는 권선으로 대체하는 경우, 회전자를 기준으로 하는 회전좌표계에서의 전압 방정식은 다음과 같다.

$$v_{qs} = R_s i_{qs} + L_s \frac{d}{dt} i_{qs} + \omega_r L_s i_{ds} + K_E \omega_r \tag{1}$$

$$v_{ds} = R_s i_{ds} + L_s \frac{d}{dt} i_{ds} - \omega_r L_s i_{qs}$$

3. 센서리스 속도제어

3.1 속도 및 위치 추정

본 연구에서 적용한 PMSM의 센서리스 속도추정 방식은 전동기 파라미터, 단자전압 및 전류를 이용하여 회전자의 위치정보를 직접 계산하는 방식이다. 식(1)의 전압방정식으로부터 계산되는 회전자의 속도 및 위치는 다음과 같다.

$$\omega_r = \frac{v_{qs} - (R_s + L_s \frac{d}{dt}) i_{qs}}{K_E + L_s i_{ds}} \tag{3}$$

$$\theta_r = \theta_0 + \int \omega_r dt \tag{4}$$

식(3)과 같이 전동기의 전압방정식을 이용한 속도추정에서 추정속도는 전동기의 전기적 파라미터의 정도에 의존하므로 전동기의 파라미터 오차로 인한 추정 위치의 보상이 필요하다. 본 연구에서 적용한 추정속도 및 위치

의 보상 알고리즘은 그림 1의 전동기 모델에서 실제측과 가상측에서의 위치 오차가 두 축의 전압차이에 비례하는 원리를 이용하는 것으로 이 전압차이를 보상함으로써 추정위치의 오차를 보상할 수 있다[3].

3.2 노이즈 저감 제어

영구자석 동기전동기의 추정속도 및 위치에 나타나는 오차는 전술한 바와 같이 전동기 파라미터 및 인가전압의 설정 오차와 측정전류의 오차 등으로부터 발생한다. 3.1절에서 기술한 추정속도 보상은 일정한 오차로 나타나는 전동기의 파라미터 및 인가전압의 오차에는 비교적 강인한 속도추정을 하지만 측정전류에 포함되는 불규칙 노이즈는 별도의 방안이 강구되어야 한다. 이에 관한 연구로서 칼만필터나 저역통과 필터를 사용하는 방식이 연구되었으나 계산이 복잡하거나 위상보상을 설계하는 문제가 야기된다.[4] 본 논문에서는 불규칙 노이즈에 대한 파라미터 영향을 분석하고 노이즈를 저감하는 동작이 이루어지도록 파라미터를 설정한다.

측정전류에 불규칙 노이즈를 포함한 측정오차가 발생하는 경우에 전압방정식으로부터 구한 전동기속도는 식(3)으로부터 다음과 같이 된다.

$$\hat{\omega} = \frac{v_{qs} - (R_s + L_s \frac{d}{dt})(i_{qs} + \Delta i_{qs})}{K_e + L_s(i_{ds} + \Delta i_{ds})} \quad (5)$$

단, $\Delta i_{qs}, \Delta i_{ds}$: 측정전류의 오차

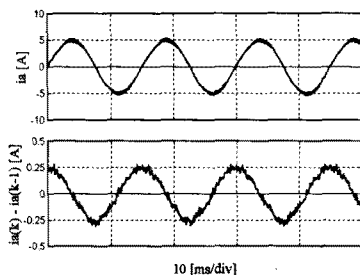
식(5)를 미소분으로 전개하여 2차항 이상을 무시하고 $i_{ds} = 0$ 이도록 벡터제어가 이루어진다고 가정하면 전동기속도는 다음과 같이 된다.

$$\hat{\omega} \approx \omega_o - \frac{(R_s + L_s \frac{d}{dt})}{K_e} \Delta i_{qs} - \frac{\omega_o L_s}{K_e} \Delta i_{ds} \quad (6)$$

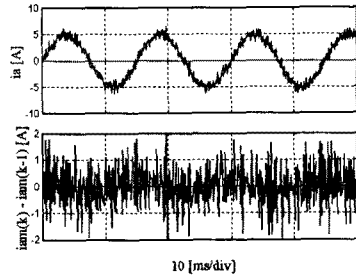
$$\text{단, } \omega_o = \frac{v_{qs} - (R_s + L_s \frac{d}{dt}) i_{qs}}{K_e}$$

식(6)에서 측정전류에 포함되어 있는 오차 중에 일정한 오차로 나타나는 오차는 3.1절에서 기술한 추정속도 보상에 의하여 비교적 강인한 속도추정을 하지만 측정전류의 측정오차중 불규칙 노이즈에 의한 오차는 별도의 방안이 강구되어야 한다. 이 경우에 식(6)의 세 번째 항에서 미분항이 문제가 된다. 따라서 전동기 파라미터중 고정자권선의 인덕턴스가 측정오차의 노이즈에 민감하게 영향을 미치는 것을 알 수 있으며 이러한 사실은 그림 2에 나타난 시뮬레이션 결과에서도 확인된다.

본 논문에서는 측정전류에 포함되는 불규칙 노이즈에 의한 추정속도의 오차를 감소하는 방안으로서 인덕턴스



(a) 불규칙 노이즈 비포함



(b) 불규칙 노이즈 포함
그림 2. 상전류 및 미분치

의 크기를 실제값 보다 작게 설정함으로써 간단하게 노이즈의 영향을 저감시킬 수 있는 방안을 제시한다. 이 경우에 식(3)에서 알 수 있는 바와 같이 정상상태 오차는 발생하지 않는다.

3.3 진화전략을 이용한 파라미터 설정

불규칙 노이즈의 영향을 최소화하는 파라미터의 최적화를 위하여 진화전략 탐색을 이용하였다. 진화전략은 목적함수의 연속성이나 미분가능성 등이 불필요하고 다른 진화 알고리즘들에 비하여 알고리즘의 구현이 간단하고 그 탐색능력이 우수하다.[5] 또한 다른 진화알고리즘에서 나타나는 부호화 과정 없이 실제 변수를 그대로 문자열로 사용할 수 있다. 진화전략은 전역 탐색능력과 국부탐색능력을 동시에 가지고 있으며 탐색구간은 랜덤 변수의 표준편차값에 의해 결정된다. 초기치에서 최적점 근처까지는 표준 편차값을 크게 하여 수렴속도를 높게 하여 탐색구간을 넓게 하고, 최적점 근처에서는 표준 편차값을 작게 하여 정확도를 높게 하여 효과적인 탐색을 할 수 있다. 진화전략은 부모세대의 수와 자손세대에서 선택되어지는 개체의 수를 달리할 수 있으며 본 논문에서는 적합도가 가장 높은 개체만을 선택하는 방식을 사용하였다.

불규칙 노이즈 영향을 최소화하는 파라미터의 최적화를 위한 지령속도 계획은 정격부하 인가상태에서의 정격속도 \rightarrow 1/2 정격속도 \rightarrow -1/2 정격속도 \rightarrow 1/2 정격속도로 스텝 가변인 속도계획을 적용하였다.

이상에서 기술한 센서리스 속도제어의 전체블록도는 그림 3과 같다.

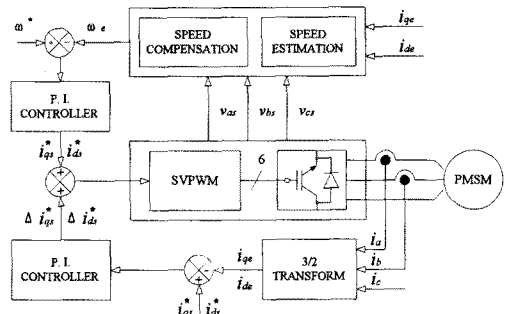


그림 3. 전체시스템의 블록도

4. 시뮬레이션

상기에서 제안한 알고리즘을 검증하기 위하여 시뮬레이션을 수행하였으며 측정전류의 노이즈에 대한 영향을

고찰하기 위해서 표준편차가 0.05 p.u.인 노이즈를 합성하여 사용하고 전동기 파라미터 설정 오차에 대한 영향을 고찰하기 위해 실제 전동기와 전동기모델의 파라미터를 다르게 설정하여 시뮬레이션 하였다.

그림 4는 진화전략 탐색에 의하여 구한 인덕턴스 설정치의 변동추이로서 정격부하 인가상태에서 지령속도가 1000rpm → 500rpm → -500rpm → 500rpm으로 가변되는 경우의 탐색 결과이며 최적 인덕턴스 설정치는 0.1p.u. 정도로 구해졌다.

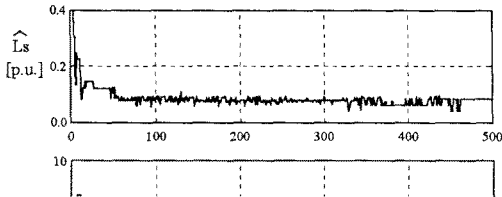


그림 4. 진화전략 탐색에서 인덕턴스 설정치의 변동추이

그림 5는 전동기모델의 인덕턴스 L_s 를 실제 전동기 인덕턴스의 1.0 p.u., 0.1 p.u.로 각각 설정하고 상전류에 표준편차 0.05 p.u.의 불규칙 노이즈를 합성시킨 경우의 결과로서 지령속도가 100rpm이고 무부하인 경우의 정상상태 속도응답이다. 그림에서 나타난 바와 같이 인덕턴스를 작게 설정하는 경우에 불규칙 노이즈의 영향이 감소됨을 보이고 있다.

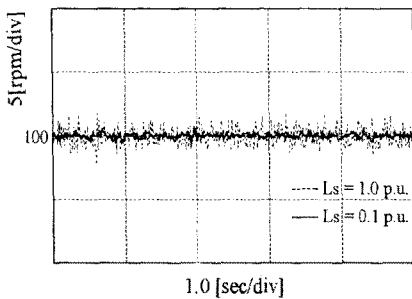


그림 5. 노이즈를 포함하는 경우의 속도응답

5. 실험결과 및 검토

제안된 알고리즘을 검증하기 위하여 실험장치를 제작하고 실험을 수행하였다. 본 연구에서 사용한 PMSM은 정격출력 600W, 3상 8극 전동기이다. 그림 6은 전동기모델의 인덕턴스를 0.1 p.u.로 설정하고 불규칙 노이즈를 합성하지 않았을 경우의 실험결과로서 지령속도가 1000rpm이고 운전중에 정격토크 5Nm를 인가하는 경우의 속도응답이다. 그림에서 나타난 바와 같이 인덕턴스 값이 작게 설정되어도 정상상태 속도오차가 나타나지 않음을 알 수 있다.

그림 7은 전동기모델의 인덕턴스를 1.0 p.u., 0.1 p.u.로 각각 설정하고 상전류에 표준편차 0.05 p.u.의 불규칙 노이즈를 합성시킨 경우의 실험결과로서 지령속도가 100rpm이고 무부하인 경우의 정상상태 속도응답을 나타낸다. 시뮬레이션 결과와 마찬가지로 인덕턴스를 작게 설정하는 경우에 노이즈 영향이 축소되어 맥동이 감소함을 나타내고 있다.

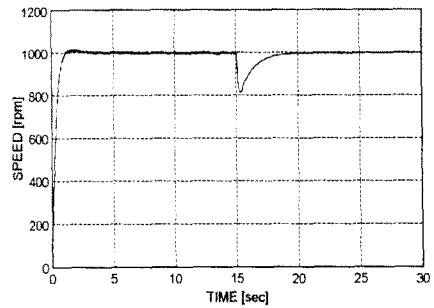


그림 6. 노이즈 없는 경우의 속도응답 실험결과

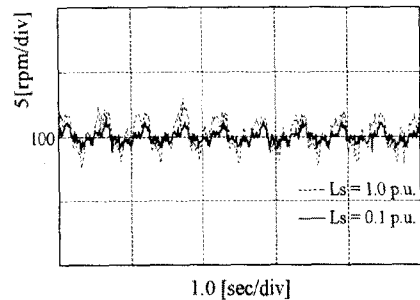


그림 7. 노이즈를 포함하는 경우의 속도응답 실험결과

6. 결론

본 논문은 영구자석 동기전동기의 위치 및 속도센서 없는 센서리스 제어방식에 관한 연구로서 추정전류에서 발생하는 노이즈의 영향을 저감하는 센서리스 속도제어를 구현하였다. 본 논문에서 제시한 제어방식은 불규칙 노이즈에 대한 추정속도의 영향을 각 파라미터에 대하여 분석하고 추정속도의 맥동이 감소하도록 파라미터를 설정하는 방식이다. 파라미터 설정은 진화전략 탐색에 의하여 최적화를 수행하였으며 시뮬레이션 및 실험결과에서 나타난 바와 같이 본 제어방식은 노이즈의 영향이 축소되어 속도리플이 종래의 방식보다 감소하는 양호한 속도응답 결과가 얻어졌다.

[참고 문헌]

- [1] K.Rajashekara, A.Kawamura and K.Matsuue, *Sensorless Control of AC Motor Drives*, IEEE Press, 1996
- [2] J.Holtz, "State of the Art of Controlled AC Drives without Speed Sensors", *Int. J. Electronics*, vol.80, no.2, pp.249-263, 1996
- [3] N.Matsui and M.Shigo, "Brushless dc Motor Control Without Position and Speed Sensors", *IEEE, IA-28*, no.1, pp.120-127, 1992.
- [4] Rached Dhaouadi, Ned Mohan, Lars Norum, "Design and Implementation of an Extended Kalman Filter for the State Estimation of a Permanent Magnet Synchronous Motor", *IEEE, PE-6*, no.3, pp.491-497, July 1991.
- [5] Thomas Back, *Evolutionary Algorithms in Theory and Practice*, Oxford Press, 1996