

영구자석 동기 전동기의 레졸버 신호 오차 보상에 관한 연구

권영화, 황선환, 김장목
부산대학교

Compensation of Resolver Asymmetrical Signal Error for PMSM Drives

Young-Hwa Kwon, Seon-Hwan Hang, Jang-Mok Kim
Pusan National University

ABSTRACT

영구자석 동기전동기(Permanent Magnet Synchronous Motor)를 벡터 제어로 구동 시 정확한 회전자 위치정보가 요구된다. 일반적으로 레졸버(Resolver)를 이용하면 회전자의 절대 위치(absolute position)를 알 수 있다. 하지만 레졸버의 변압비 차이, 불평형 여자신호, 불균일한 인덕턴스 성분, 신호처리 회로상의 왜곡으로 인해 신호의 크기 불평형이 발생하고 이는 위치정보에 주기적인 오차 성분이 나타나게 되며, 이러한 오차 성분들은 토크에 영향을 준다.

본 논문에서는 이러한 오차 성분을 수학적 해석을 바탕으로 확인하고 보상하는 방법을 제안하였다. 제안된 알고리즘의 타당성을 실험을 통해 검증하였다.

1. 서론

영구자석 동기전동기를 벡터 제어로 구동하기 위해서는 정확한 회전자 위치정보가 요구 된다. 전동기의 위치정보를 제공하는 대표적인 센서로는 홀센서, 엔코더, 레졸버 등이 있다.

레졸버는 먼지, 기름, 충격 등의 환경적 요인에 강하고 넓은 온도 범위에서 사용 가능하다. 홀센서나 엔코더를 사용한 시스템에서는 전동기가 정지해 있는 경우 회전자의 위치를 알 수 없지만, 레졸버를 사용하면 전동기가 정지한 경우에도 회전자의 위치를 측정할 수 있다.

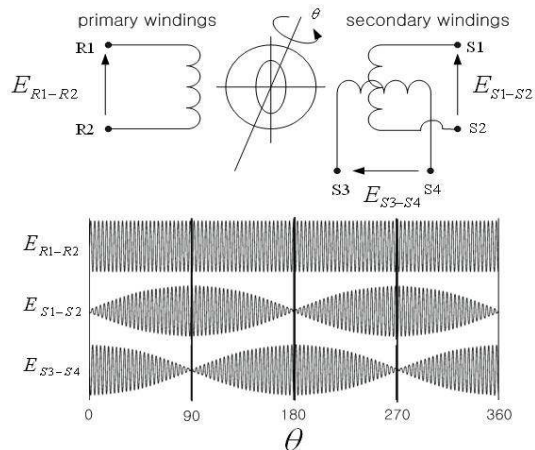


그림 1 레졸버의 구성 및 신호
Fig. 1 Schematic and signals of resolver

레졸버는 그림 1과 같이 기본적으로 하나의 1차측 회전자(rotor)와 두 개의 2차측 고정자(stator)권선으로 구성되어 있으며, 회전 변압기의 동작과 비슷하다. 2개의 고정자 권선은 90도 위상차를 발생시키기 위한 구조로 배치되어 있으며 1차권선에 2~10[kHz]의 정현파 여자(excitation)신호를 식(1)과같이 주입하면 2차측에는 회전자의 위치에 따라 식(2), (3)과 같은 크기의 회전자 위치정보를 포함한 신호가 유기된다.

$$E_{R1-R2} = E \sin \omega t \quad (1)$$

$$E_{S1-S2} = KE \sin \omega t \cdot \sin \theta \quad (2)$$

$$E_{S3-S4} = KE \sin \omega t \cdot \cos \theta \quad (3)$$

여기에서 K는 변압비, ω 는 여자신호의 각속도[rad/sec]이고 θ 는 회전자의 위치이다.

본 논문에서는 신호 크기의 불평형에 의해 나타나는 오차를 확인하고 이를 보상하는 방법을 제안하고 실험을 통해 제안된 모델의 타당성을 입증하였다.

2. 레졸버의 위치각 오차^{[1][2]}

레졸버는 변압비 차이, 불평형 여자신호, 불균일한 인덕턴스 성분, 신호처리 회로상의 왜곡으로 인해 출력 신호 사이에 크기의 불평형이 발생한다. 이를 수식으로 나타내면 식(2), (3)은 불평형 성분을 포함한 식(4), (5)로 표현할 수 있다.

$$E_{S1-S2} = KE \sin \omega t \cdot \sin \theta \quad (4)$$

$$E_{S3-S4} = KE(1 + \alpha) \sin \omega t \cdot \cos \theta \quad (5)$$

여기에서 α 는 신호크기의 차이를 나타낸다.

회전자 위치정보를 추출하기 위해 $\cos \phi, \sin \phi$ 를 곱하여 두 신호의 차동성분을 계산하면 다음과 나타낼 수 있다.

$$E_1 = KE \sin \omega t \cdot \sin \theta \cdot \cos \phi \quad (6)$$

$$E_2 = KE(1 + \alpha) \sin \omega t \cdot \cos \theta \cdot \sin \phi \quad (7)$$

$$E_{1-2} = KE \sin \omega t [\sin \theta \cos \phi - (1 + \alpha) \cos \theta \sin \phi] \quad (8)$$

식(8)을 복조하여 여자신호($\sin \omega t$)를 제외하고 Envelope 신호만을 구하면 식(9)와 같이 나타낸다.

$$E = KE[\sin(\theta - \phi) - \alpha \cos\theta \sin\phi] \quad (9)$$

회전자 위치 추정신호인 ϕ 를 θ 와 일치시키면 ($\theta - \phi = \epsilon$)는 영이 되지만, α 로 인해 식(9)와 같이 오차 성분이 나타나게 되고, 이 오차 성분을 계산하기 위하여 식(9)를 영으로 두면 다음과 같은 식을 구할 수 있다.

$$\sin(\theta - \phi) = \alpha \cos\theta \sin\phi = \sin\epsilon \quad (10)$$

$\theta - \phi$ 가 영에 가까우면 $\sin\epsilon \approx \epsilon$ 이 되고, $\theta = \epsilon$ 이므로 위치 오차는 식(11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sin\epsilon \approx \epsilon = \frac{\alpha}{2} \sin(2\theta) \quad (11)$$

3. 위치오차에 의한 토크 맥동

토크 맥동을 살펴보기 위해 오차 성분이 포함된 위치에 의한 전류 맥동을 살펴볼 필요가 있다.

$$i_{ds}^s = i_{as} = -I_m \sin\omega t \quad (12)$$

$$i_{qs}^s = \frac{1}{\sqrt{3}}(i_{bs} - i_{cs}) = I_m \cos\omega t \quad (13)$$

2상 정좌표계 전류를 식(12), (13)이라 했을 때 동기좌표계 전류는 실제 전류와는 달리 식(14), (15)와 같이 나타난다.

$$i_{ds}^e = i_{ds}^s \cos(\theta + \epsilon) + i_{qs}^s \sin(\theta + \epsilon) = I_m \sin\epsilon \quad (14)$$

$$i_{qs}^e = -i_{ds}^s \sin(\theta + \epsilon) + i_{qs}^s \cos(\theta + \epsilon) = I_m \cos\epsilon \quad (15)$$

식 (14), (15)에서 보는 것과 같이 레졸버에 의한 위치오차는 전류의 동기좌표계 변환과 역변환에 맥동을 야기 시킨다.

동기좌표계에서 맥동의 차수 f_n 는 식(16)와 같이 전동기의 극수와 레졸버의 극수에 의해 결정된다.

$$f_n = \frac{P_{resolver}}{P_{motor}} \times 4 \quad (16)$$

여기서 $P_{resolver}$ 는 레졸버의 극수이고, P_{motor} 는 전동기의 극수이다.

일반적인 PMSM의 토크는 식(17)과 같다.^[3]

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} (i_{qs}^e i_{ds}^e + \lambda_f i_{qs}^e) \quad (17)$$

여기서 λ_f 는 영구 자석에 의한 계자자속이고 P는 전동기극수이다.

식(14), (15)를 식(17)에 대입하면 식(18)과 같은 토크에 맥동이 생기게 된다.

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \lambda_f I_m \cos\epsilon \quad (18)$$

4. 위치오차 보상 알고리즘

오차 성분이 포함된 회전자 위치를 보상하기위해 그림 2와 같이 오차 성분의 크기인 $\frac{\alpha}{2}$ 와 주기를 계산하여 회전자위치에 직접 보상하는 방법을 제안하고자 한다.

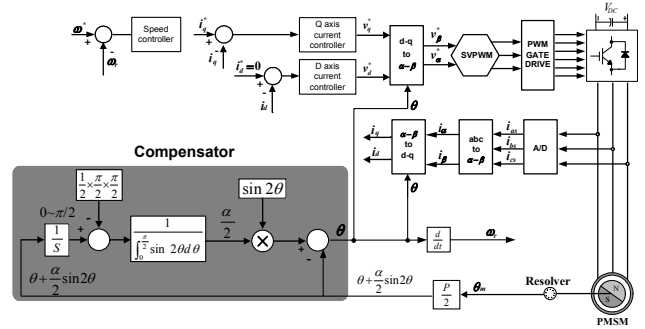


그림 2 위치 오차 보상 구성도
Fig. 2 Position error compensation scheme

레졸버 신호 크기 불평형에 의해 나타나는 회전자 위치 오차는 식(11)과 같이 주기적인 오차이다. 주기적 오차 성분의 주기가 $\sin(2\theta)$ 인 것을 알고 있기 때문에 크기성분인 $\frac{\alpha}{2}$ 를 찾으면 오차 성분을 보상할 수 있다.

정상상태의 속도에서 정상적인 회전자 위치는 직선으로 증가해야 하지만 주기적 오차 성분을 포함한 회전자 위치는 그림 3의 (a)과 같이 오차 성분을 포함하게 된다. 정상적인 회전자 위치와 오차 성분을 포함한 회전자 위치는 $\frac{\pi}{2}$ 에서 만나게 되

므로, $0 \sim \frac{\pi}{2}$ 까지 적분 값의 차를 그림 3의 (c)과 같이 구할 수 있게 된다. 그림 3의 (b)의 적분 값은 삼각형 넓이 즉 $\frac{1}{2} \times \frac{\pi}{2} \times \frac{\pi}{2}$ 로 구할 수 있다. 그림 3의 (c)에서 크기인 $\frac{\alpha}{2}$ 를 구하기 위해서는 크기가 1인 $\sin 2\theta$ 를 $0 \sim \frac{\pi}{2}$ 까지 적분하여 나누어주면 $\frac{\alpha}{2}$ 의 값을 구할 수 있다.

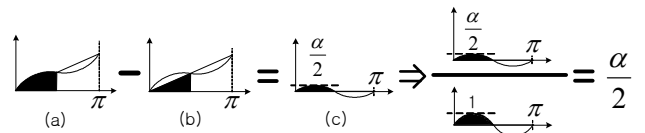


그림 3 위치 오차 성분의 크기 검출 방법
Fig. 3 Detection method of amplitude of position error

앞에서 주기적인 회전자 위치 오차 성분의 크기를 구했기 때문에 아래 그림 4에서와 같이 주기를 곱하여 오차 성분을 구하고, 오차 성분을 포함한 회전자 위치 값에서 오차 성분을 빼주어 회전자 실제 위치를 얻을 수 있다.

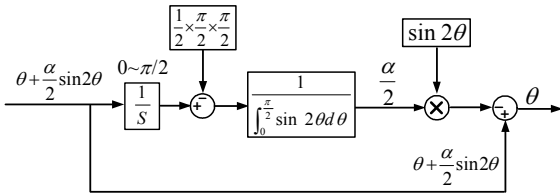


그림 4 위치 오차 성분 검출방법 및 보상 방법
Fig. 4 Compensation method of position error

5. 시뮬레이션 및 실험

제안된 알고리즘을 검증하기 위해 1.5kw, 7.5A, 6극 PMSM 과 3극(3X) 레졸버를 시뮬레이션 및 실험에 적용 하였다.

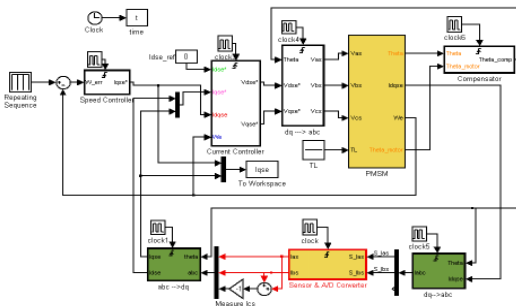


그림 5 시뮬레이션 구성도
Fig. 5 Scheme of simulation

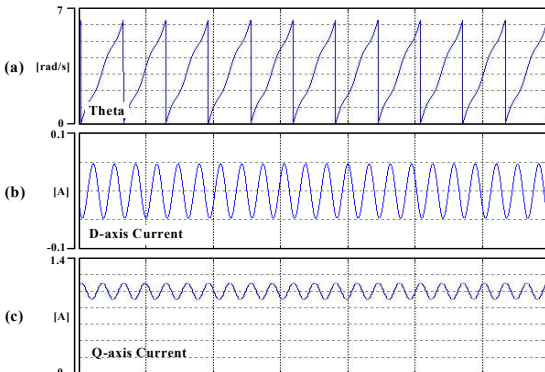


그림 6 보상 전 시뮬레이션 결과
Fig. 6 Simulation results before compensation

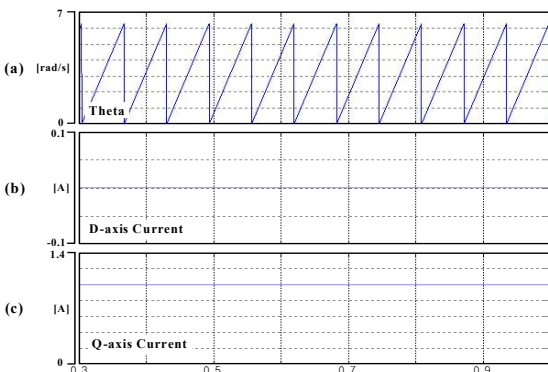


그림 7 보상 후 시뮬레이션 결과
Fig. 7 Simulation results after compensation

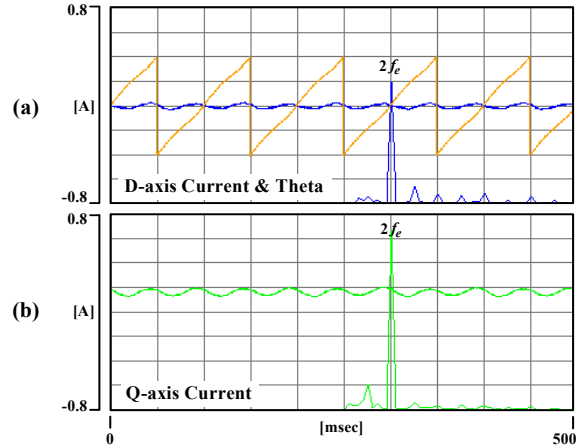


그림 8 보상 전 실험 결과
Fig. 8 Experiment results before compensation

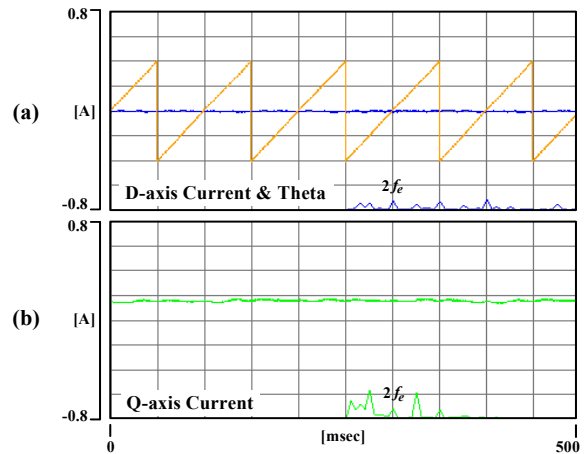


그림 9 보상 후 실험 결과
Fig. 9 Experiment results after compensation

6. 결론

레졸버는 변압비 차이, 불평형 여자신호, 불균일한 인덕턴스 성분, 신호처리 회로상의 왜곡 등으로 인해 출력신호의 불평형이 발생한다. 이로 인해 발생하는 주기적인 위치오차를 수학적으로 분석하고 보상하여 토크 맥동 저감 방법을 제시하였다. 제안한 알고리즘을 시뮬레이션과 시험을 통해 검증할 수 있었고, 위치오차의 감소를 확인 할 수 있었다.

참고 문헌

- [1] 목형수, 이정민, 최규하, 김상훈, 조영훈, "PMSM의 벡터 제어시 위치센서 오차에 의해 발생하는 토크 리플에 대한 해석과 그 보상 방법", 전력전자 학회 논문집, p449-455, 2007년 12월.
- [2] Hanselman, D.C, "Resolver Signal Requirements for High Accuracy Resolver-to-Digital Conversion", Industrial Electronics, IEEE Transactions on, Vol. 37, Page(s):556-561, 1990, Dec.
- [3] 설승기, "전기기기 제어론", 브레인 코리아, 2002