

중성점전압보상 방식을 이용한 브러시리스직류전동기의 회전자위치 추정

宋重鎬[†]

A Rotor Position Estimation of Brushless DC Motors using Neutral Voltage Compensation Method

Joong-Ho Song

요약

본 논문은 브러시리스직류전동기의 새로운 회전자위치추정 방법에 관한 것이다. 회전자 위치추정이 부정확하게 이루어졌을 때, 역기전력과 상전류 사이의 위상차가 나타나고 이는 다시 전동기의 토크리플을 일으킨다는 사실은 알려져 있다. 이러한 추정오차를 줄이기 위하여 인버터의 정상모드 기간 중에 나타나는 중성점전압을 기반으로 하는 새로운 방법을 제안하고 있다. 이 중성점전압이 효과적인 회전자 위치 추정오차의 한 지표임을 확인하고, 중성점전압의 발생, 획득방법, 보상방법 등을 다루고 있다. 본 알고리즘은 전동기 단자전압센서와 단일 직류링크 전류센서만을 이용하여 실현할 수 있으며, 관련 시뮬레이션 및 실험결과는 그 타당성을 보여주고 있다.

ABSTRACT

This paper presents a new rotor position estimation method for brushless DC motors. It is clear that the estimation error of the rotor position provokes the phase shift angle misaligned between the phase current and the back-EMF waveforms, which causes torque ripple in brushless DC motor drives. Such an estimation error can be reduced with the help of the proposed neutral voltage-based estimation method that is structured in the form of a closed loop observer. A neutral voltage appearing during the normal mode of the inverter operation is found to be an observable and controllable measure, which can be dealt with for estimating an exact rotor position. This neutral voltage is obtained from the DC-link current, the switching logic, and the motor speed values. The proposed algorithm, which can be implemented easily by using a single DC-link current and the motor terminal voltage sensors, is verified by simulation and experiment results.

Key words : brushless DC motor, rotor position estimation, neutral voltage compensation

1. 서론

사다리꼴 역기전력파형을 가지는 브러시리스 직류

전동기(이하 브러시리스직류전동기)는 구동 인버터의 전류전환을 위하여 홀센서나 엔코더를 필요로 한다. 이들 회전자 위치센서들은 조합된 액츄에이터 가격을 상승시키고, 구동계의 전력밀도를 낮추게 되기 때문에, 이 위치센서를 사용하지 않는 방법들이 많이 연구되고 있다.^[1-4]

브러시리스 직류 전동기의 대표적인 센서리스 제어

[†]교신저자 : 정회원, 서울산업대 전기공학과 조교수
E-mail : joongho@snut.ac.kr
접수일자 : 2004. 7. 23 1차 심사 : 2004. 8. 17
심사완료 : 2004. 9. 2

방법 중에서 단자 전압의 파형을 이용하는 방법은 검출한 단자 전압의 정보로부터 역기전력이 영이 되는 시점을 찾아내어, 이 시점을 상 지연 회로(phase shift circuit)나 저역 통과 필터(low pass filter) 등을 이용하여 30°혹은 90°만큼 상 지연시켜서 인버터 전환시점을 결정한다. 이러한 방법은 제어 회로가 간단하고, 비교적 넓은 속도 영역에서 센서리스 제어가 가능하다는 장점을 가지고 있어서 널리 사용되고있다. 그러나 실제 역기전력과 단자전압 사이에는 위상차가 존재하고 또한 저역 통과 필터나 상 지연 회로는 주파수특성을 가지고있기 때문에 가변속시에 전동기 상전류파형과 역기전력파형이 완전히 일치되지 못하고 주파수 특성에 따라 지상(lagging phase shift) 또는 진상(leading phase shift)의 위상차가 나타난다. 이러한 방법의 한 변형으로서 전동기 단자전압 검출회로를 간략화시킨 방법도 제시된 바 있다.^[3] 인버터의 상전류 전환시점이 전동기의 공극자속분포 파형과 정확히 맞으면 어느 특정 부하를 구동하기 위하여 필요한 고정자전류는 최소치를 유지한다는 사실을 기반으로하는 자기동조알고리즘을 이용한 센서리스제어방법이 발표된 바 있다.^[4]

본 논문에서는 모터와 인버터 사이의 중성점 전압을 이용한 새로운 센서리스 제어 기법을 제안한다. 먼저 역기전력과 상전류의 위상이 동기 되는 경우 인버터 정상모드구간에서 발생하는 중성점 전압은 영의 값을 가지지만, 동기 되지 않는 경우 중성점 전압은 영이 아닌 다른 값을 가진다는 기본적인 특성을 이용하여 관측과 제어가 가능한 중성점 전압 보상기를 설계한다. 그리고 중성점 전압 보상기를 단자 전압을 이용한 회전자 위치 검출기에 결합함으로써 정확한 회전자의 위치 추정을 가능하게 하였다. 제안한 방식의 효율성과 성능을 입증하기 위해 시뮬레이션과 실험을 통해 그 결과를 확인하고 고찰하였다.

그림 1은 직류링크전류 제어식 브러시리스직류전동기 구동시스템의 기본 구성을 보이고 있다. 여기서는 인버터 상전류의 전환시점은 전동기 단자전압신호에 의해 결정된다. 인버터 전환시점을 결정할 수 있는 역기전력신호는 전동기 단자전압으로부터 구해질 수 있으나, 신호의 위상차를 만들기 위하여 사용되는 위상 전이필터는 넓은 전동기 가변속 범위에 걸쳐 사용하기에는 어려운 주파수특성을 보이고 있다.

회전자 위치추정이 정확하게 이루어지면, 전동기구동 전류의 120도 구형파전류 파형이 전동기 역기전력의 120도 flat top 부분에 일치되는 위상관계를 이루게 된다(그림 2). 두 파형사이의 위상각차 α 에 따른 전동기

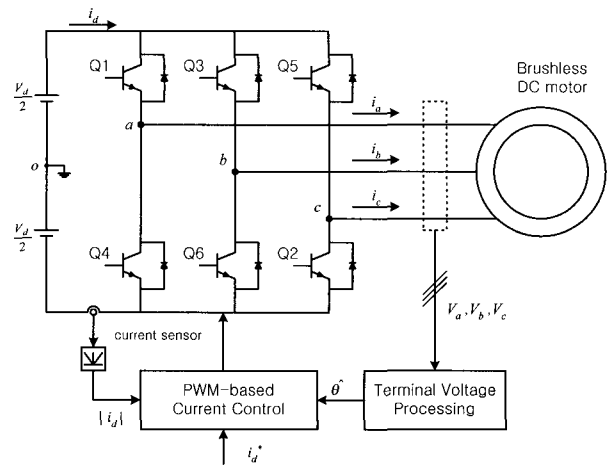


그림 1 기본적인 브러시리스 직류 전동기의 구동
Fig. 1 Basic brushless DC motor drive system

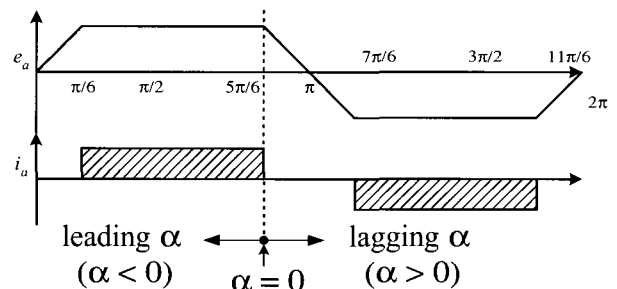


그림 2 상전류와 역기전력 사이의 위상각 정의
Fig. 2 Phase shift between phase-current and electromotive force

의 발생토크리플은 그림 3과 같이 나타난다. 그림 3의 결과는 회전자 위치 오차에 의해 발생하는 전동기 토크리플은 인버터전환에 의한 전환토크리플보다도 크다는 것을 보여주고 있다. 따라서 역기전력과 상전류 사이의 위상차를 감소시킬 필요가 있으므로 이에 대하여 다음 절에서 기술한다.

2. 중성점전압 및 그 보상

서론에서 설명한 바와 같은 상전류와 역기전력사이의 위상차를 나타내주는 하나의 측정 지표물을 찾는 것이 필요하다. 이 측정지표 중의 하나가 인버터 정상모드 구간에서 발생하는 중성점전압이다. 편의상 그림 3과 같이 인버터의 동작모드 중 Q6에서 Q2로의 전환모드만을 보기로 한다. 먼저 중성점 전압을 수식적으로

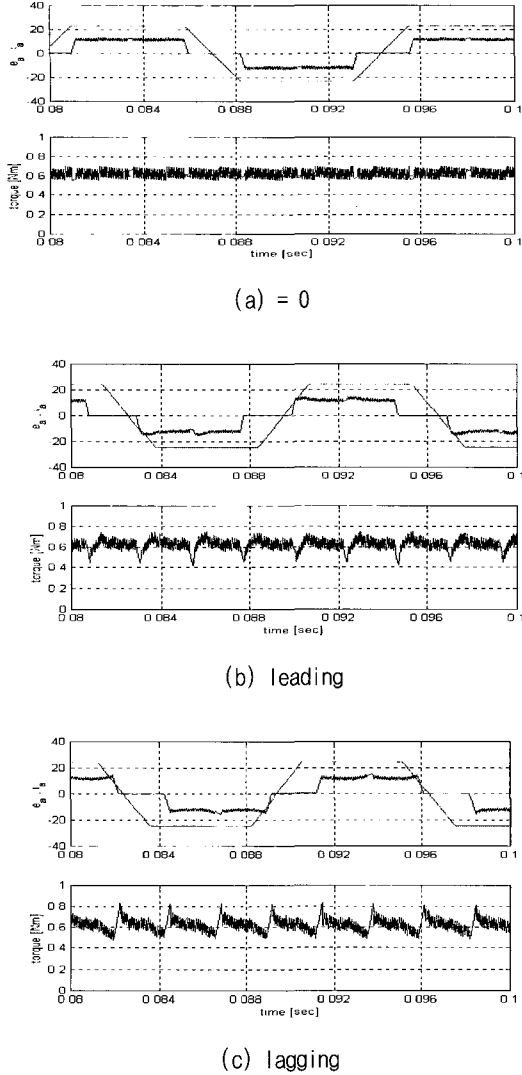


그림 3 회전자 위치 추정 오차에 따른 영향
Fig. 3 Influences of rotor position error

유도하고 이를 통하여 위치 추정 오차에 따른 중성점 전압의 특성을 분석한다. 그림 4(a) 에서와 같이 인버터의 스위치 Q1과 Q6이 PWM동작하는 정상 구간에서의 중성점 전압을 고찰해보자. 이 구간에서의 전압 방정식은 식 (1), (2)로 나타낼 수 있다.

$$V_a = \frac{V_d}{2} \cdot S = Ri_a + L \frac{di_a}{dt} + e_a + v_{no} \quad (1)$$

$$V_b = -\frac{V_d}{2} \cdot S = Ri_b + L \frac{di_b}{dt} + e_b + v_{no} \quad (2)$$

여기서 V_d 는 직류링크전압, V_a, V_b, V_c 는 단자전압, e_a, e_b, e_c 는 역기전력, R 은 권선저항, L 은 권선인덕턴스, i_a, i_b, i_c 는 상전류, i_d 는 직류링크전류, V_{no} 는 중성점전압이다. $i_a = |i_d|, i_b = -|i_d|$ 이므로, 식 (1), (2)로부터 중성점 전압을 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} v_{no} &= -\frac{1}{2} \left[R(i_a + i_b) + L \left(\frac{di_a}{dt} + \frac{di_b}{dt} \right) + e_a + e_b \right] \\ &= -\frac{1}{2} (e_a + e_b) \end{aligned} \quad (3)$$

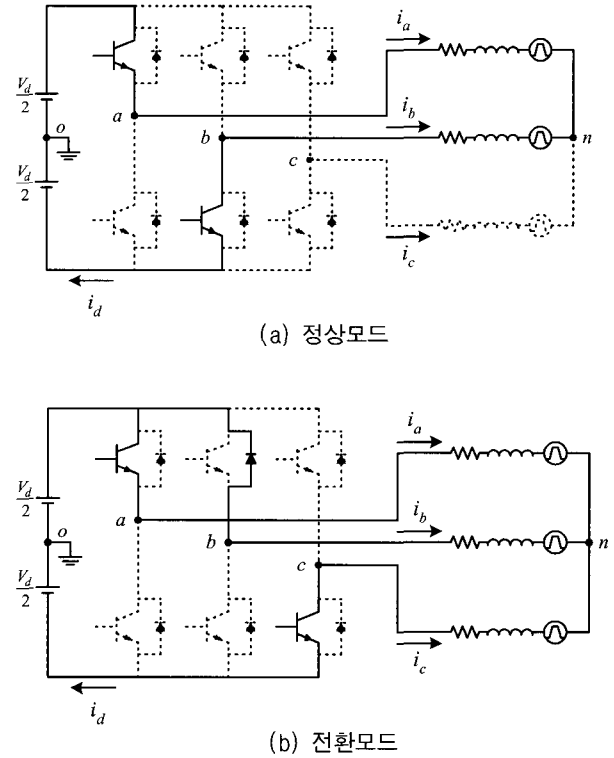


그림 4 인버터의 PWM 동작
Fig. 4 Inverter operation modes

다음 전환시퀀스모드에서 일어나는 각각의 상전압과 중성점전압 관계식은 식 (4) - (7)과 같다. 그림 4(b)에서와 같은 전환모드에서의 전압 관계식과 중성점 전압은 마찬가지로 방법으로 각각 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_a = \frac{V_d}{2} \cdot S = Ri_a + L \frac{di_a}{dt} + e_a + v_{no} \quad (4)$$

$$V_b = -\frac{V_d}{2} = Ri_b + L \frac{di_b}{dt} + e_b + v_{no} \quad (5)$$

$$V_c = -\frac{V_d}{2} \cdot S = Ri_c + L \frac{di_c}{dt} + e_c + v_{no} \quad (6)$$

$$v_{no} = -\frac{V_d}{6} - \frac{e_a + e_b + e_c}{3} \quad (7)$$

그림 2에서 정의된 위상각차에 따라서 중성점전압 파형을 그려보면 그림 5와 같이 나타난다. 전환모드 구간에서 나타나는 중성점전압은 좁은 펄스파형을 띠고 있으며, 이 전압파형은 역기전력과 상전류 사이의 위상각차 즉, 회전자위치 추정 오차에 대해서는 거의 변화가 없이 일정한 값을 보여주고 있음을 확인할 수 있다. 이에 반하여, 인버터의 정상모드 구간에서 발생하는 중성점전압은 램프-다운 또는 램프-업하는 삼각 파형태를 띠고 있다. 이 정상모드 구간에서 발생하는 중성점전압이 바로 본 논문에서 초점을 맞추고 있는 회전자위치추정 오차에 해당하는 지표이다. 브리시리스 직류 전동기의 중성점 전압은 일반적으로 전환모드를 제외한 정상모드에서는 통전 되는 상의 역기전력이 크기는 같지만 부호는 반대이므로 그림 5의 $\alpha=0$ 인 경우와 같이 항상 영의 값을 가진다. 그러나 상전류의 통전 구간이 역기전력과 정확히 일치하지 못하고 위상차가 존재하면, 정상 구간에서의 중성점 전압은 램프-다운 또는 램프-업하는 삼각파 성분도 포함되어 그림 5의 $\alpha \neq 0$ 인 경우의 파형을 갖게 된다.

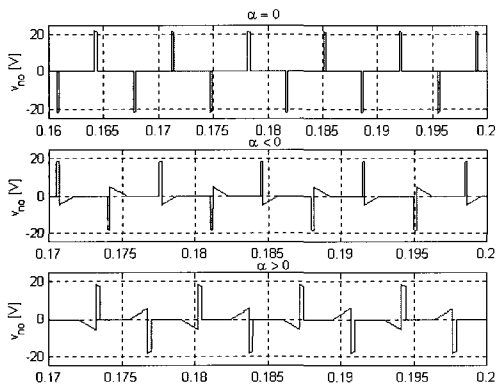


그림 5 위상각 차에 따른 중성점 전압의 발생
Fig. 5 Neutral voltage occurrence

앞의 분석을 통해서 알 수 있듯이 정상모드 구간에

서 나타나는 중성점전압의 파형은 위치 추정 오차를 아주 잘 반영하고 있음을 알 수 있다. 그러나 정상모드 구간에서 발생하는 중성점전압에 관한 식 (3)은 실제 측정이 어려운 역기전력 순시치를 포함하고 있으므로, 이 식은 중성점전압 값을 얻기 위하여 직접적으로 이용될 수는 없다. 따라서 이 중성점전압을 얻어내기 위한 방법을 고안할 필요가 있다.

상전류의 통전구간이 역기전력보다 α 만큼 앞선 경우, Q1과 Q6이 PWM동작하는 정상모드 구간에서의 중성점 전압 추정식은 식 (2)로부터, $i_b = -|i_a|$, $e_b = -E$ 임을 이용하여 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$\hat{v}_{no} = -\frac{V_d}{2} \cdot S + R|i_a| + L \frac{d|i_a|}{dt} + E \quad (8)$$

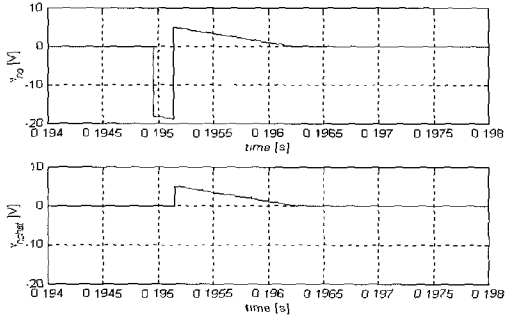
이 식이 실제의 중성점전압의 표현식 (3)을 만족하는지 확인 할 수 있다. 식 (1)에서 $i_a=i_d$ 임을 고려하면, 다음 식 (9)의 관계를 표현할 수 있다. 식 (3)과 식 (9)를 식 (8)에 대입하면, 식 (8)의 추정식은 식 (3)의 중성점전압식과 동일함을 알 수 있다.

$$\begin{aligned} R|i_a| + L \frac{d|i_a|}{dt} &= \frac{V_d}{2} \cdot S - e_a - v_{no} \\ &= \frac{V_d \cdot S - e_a + e_b}{2} \end{aligned} \quad (9)$$

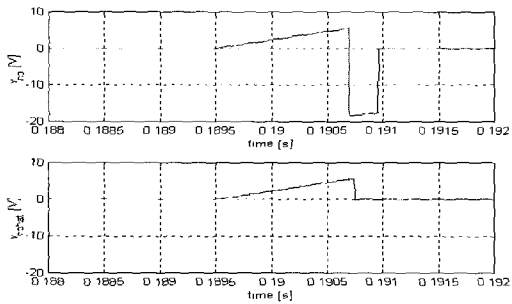
위에서 확인한 식 (8)의 중성점전압 추정치와 식 (3)의 중성점 전압치 사이의 관계를 그림 6에서 볼 수 있다. 이 그림의 위 파형은 식 (3)의 중성점전압을 나타내고, 아래 그림은 식 (8)의 중성점전압을 각각 나타내고 있다. 식 (8)의 중성점전압이 실제의 식 (3)의 중성점전압을 인버터의 정상모드 구간에서 충실히 추적하고 있음을 보여주고 있다.

인버터 정상모드구간에서 발생하는 중성점전압을 적절한 보상방법을 이용하여 조절 제거할 수 있다면, 회전자 위치추정 오차를 줄여나가는 것이 가능할 것이다. 제안하는 회전자 위치 추정 루프는 그림 7과 같이 구성할 수 있다. 기본적으로 단자 전압의 파형을 이용한 회전자 위치 추정 루프에 중성점 전압 보상 루프를

더한 이중적 구조로 되어있으며, 여기서 $\hat{\theta}_1$ 과 $\hat{\theta}_2$ 는 각각 회전자 위치 추정 루프와 중성점 전압 보상 루프의 출력이고, $\hat{\theta}$ 은 최종적인 회전자의 위치 정보가된



(a) 지상각



(b) 전상각

그림 6 실제 중성점 전압과 추정 중성점 전압
Fig. 6 Actual and estimated neutral voltages

다. 이 추정루프는 인버터 정상모드 구간에서 발생하는 중성점전압을 보상해나가는 동작특성을 보여주고 있다. 단자전압 기반 회전자위치 추정루프는 개략의 위치점을 찾아가고, 보다 정밀한 위치추정은 중성점보상루프에 의하여 달성된다.

3. 시뮬레이션 및 실험

시뮬레이션 및 실험에 사용된 전체 시스템의 제어 블록도는 그림 8과 같다. 브러시리스직류모터는 4극, 40V, 45W, 1500rpm의 정격데이터를 가지고 있고, 전체적인 실험구성도는 그림 9와 같다. 단자 전압 검출을 통해 회전자의 위치 및 속도에 대한 정보를 검출하고, 인버터의 직류단 단일 전류 센서를 통해서 전류를 제어한다. 제어용 프로세서는 전동기의 실시간 제어에 적합한 TI사의 TMS320F243 DSP를 이용하였다. PC와 DSP 보드 사이의 프로그램 및 데이터전송은 TMS320F24x DSP칩 전용 에뮬레이터인 JTAG을 통해 이루어진다. 전동기의 입력 전원은 Tektronix사에

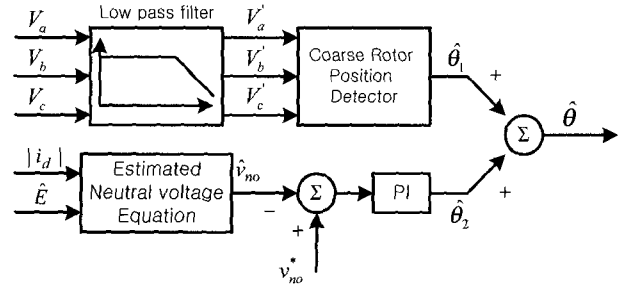


그림 7 중성점 전압 보상을 이용한 회전자 위치 추정 루프
Fig. 7 Position estimation loop based on neutral voltage compensation

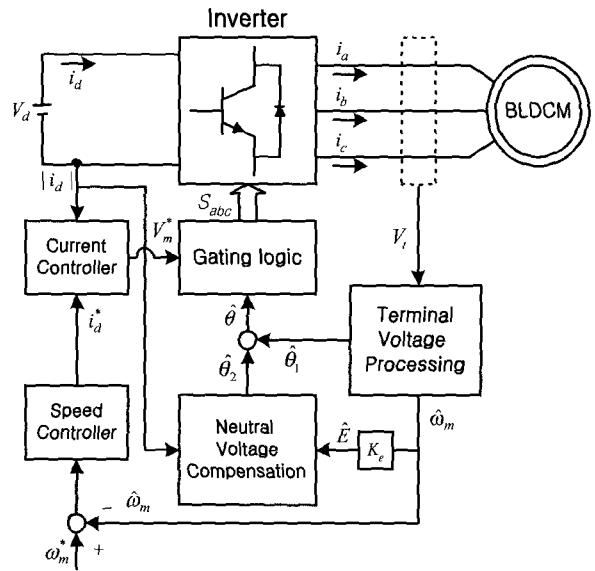


그림 8 전체 제어 블록도
Fig. 8 Overall control block diagram

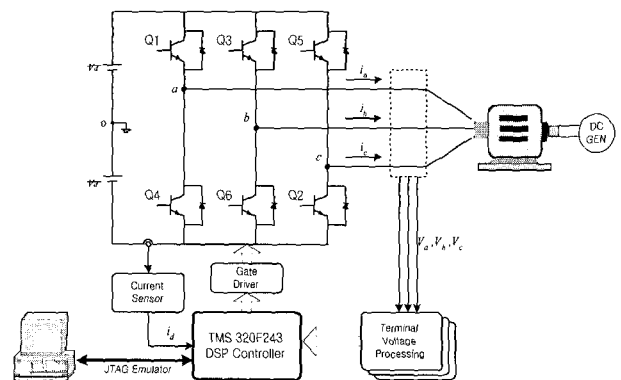
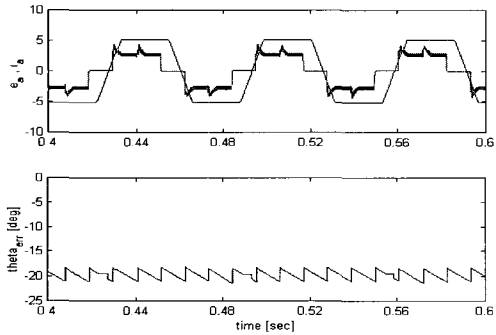
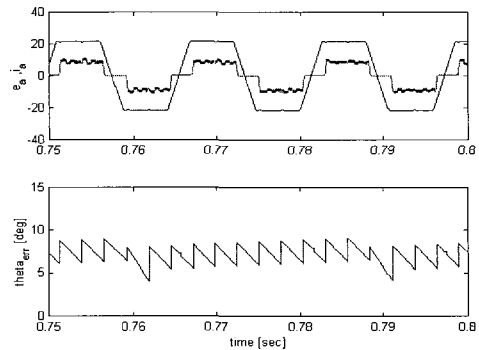


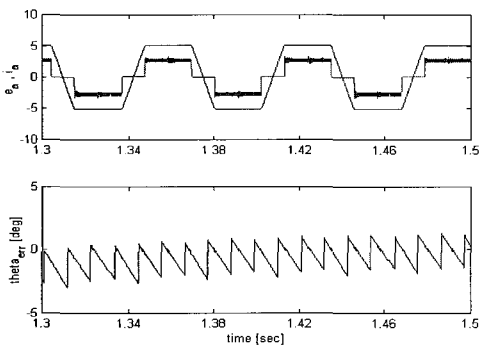
그림 9 전체 실험 구성도
Fig. 9 Experimental set-up



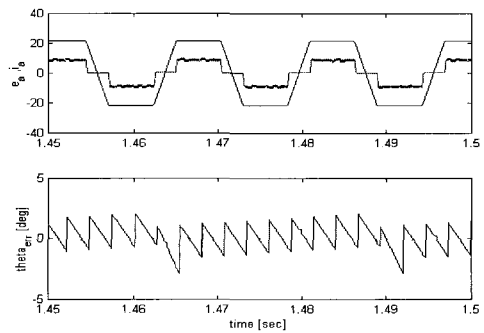
(a) 보상전



(a) 보상전



(b) 보상후



(b) 보상후

그림 10 500rpm 에서 전동기 위치 오차의 추정 특성
Fig. 10 Estimation characteristics of rotor position at 500rpm

그림 11 2000rpm 에서 전동기 위치 오차의 추정 특성
Fig. 11 Estimation characteristics of rotor position at 2000rpm

서 제공한 전원장치를 사용하였고, 부하 토크를 걸어 주기 위해 브러시리스 직류 전동기의 회전축과 기계적 커플링으로 연결된 직류 발전기를 사용하였다. 전류 제어기는 응답 특성이 우수한 데드비트 제어기(Deadbeat controller)를 사용하였으며, 50 μ s마다 동작하고, 속도 제어기 일반적으로 많이 사용하는 비례적분 제어기(PI controller)를 사용하고 1ms의 주기로 동작한다.

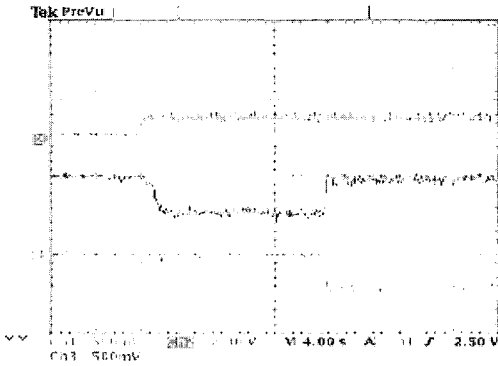
회전자의 위치추정은 전동기 상전류와 역기전력사이의 위상차와 직접적으로 관계되고 있음을 그림10의 시뮬레이션결과에 보여주고 있다. 500rpm에서 약 -20°(진상각)의 위상오차가 발생하고 있을 때, 중성점전압 보상을 통하여 이 오차가 거의 제거되고 있음을 보여주고 있다. 그림 11은 전동기속도가 2000rpm일 때, 약 7°(지상각)의 위상오차가 발생하고 있으며, 이 보상도 이루어지고 있음을 확인할 수 있다.

그림 12(a)는 500rpm일 때의 실험결과이다. 약 -18°

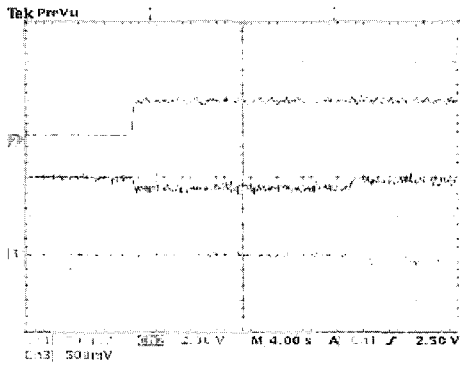
의 위상오차가 보상알고리즘이 동작하면서 영으로 줄어들음을 보여주고 있다. 그림 12(b)는 1000rpm일 때, 위상오차가 -5°의 보상을 보여주고 있다. 마찬가지로 그림 12(c)는 2000rpm에서의 위상오차가 약 10°의 보상실험결과를 보여주고 있다.

4. 결 론

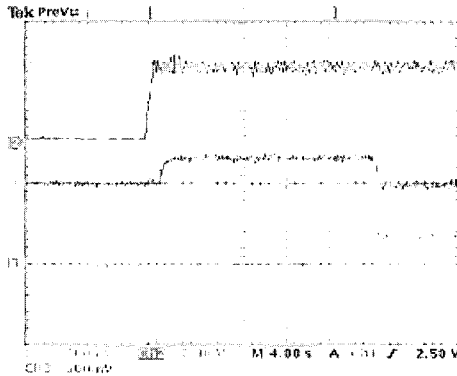
본 논문에서는 브러시리스 직류 전동기의 회전자 위치 추정 제어에 관한 것으로, 실제 센서리스 시스템에서 발생할 수 있는 회전자 위치 추정 오차를 중성점전압 보상 루프를 이용하여 보상하는 방법을 제안하였다. 먼저 인버터의 동작 모드중 정상모드 구간에서 발생하게 되는 중성점전압이 회전자 위치오차의 하나의 측정변수임에 착안하여 그 발생 메카니즘과 추정방법 및 보상방법들을 제시하였다. 회전자위치추정이 정확하게 이루어져서 인버터의 출력전류와 전동기의 역기



(a) 500rpm



(b) 1000rpm



(c) 2000rpm

그림 12 전동기 속도와 위치 추정 오차의 응답특성

- ① 위치 오차 θ_{err} : $18^\circ/\text{div}$, ② 전동기 속도 ω_m : $1000\text{rpm}/\text{div}$, ③ 위치 보상 신호 θ_2 : $18^\circ/\text{div}$;
시간 : 4 sec/div

Fig.12 Responses of several variables

- ① rotor position error θ_{err} : $18^\circ/\text{div}$, ② motor speed ω_m : $1000\text{rpm}/\text{div}$, ③ compensation signal θ_2 : $18^\circ/\text{div}$;
time: 4 sec/div

전력 파형이 정상적으로 정렬되어 맞추어지도록 인버터스위칭이 일어나는 경우는, 이 중성점전압이 발생하지 않는다는 사실에 근거하여 중성점전압을 추정하고 보상하는 알고리즘을 제시하였다. 얻어진 시뮬레이션 및 실험 결과는 제안하는 알고리즘의 타당성 및 유효성을 뒷받침해주고 있다.

본 연구는 한국학술진흥재단 2003신진교수 연구 과제(과제번호 KRF-2003-003-D00137)지원에 의하여 수행 되었음.

참 고 문 헌

- [1] J. P. Johnson, M. Ehsani, and Y. Guzelgunler, "Review of sensorless methods for brushless DC," IEEE pp. 143~150, 1999.
- [2] K. Iizuka, H. Uzuhashi, M. Kano, T. Endo, and K. Mohri, "Microcomputer control for sensorless brushless motor," IEEE Trans. Industry Application, Vol. IA21, No. 4, pp. 595~6-1, 1985.
- [3] H. C. Chen and C. M. Liaw, "Sensorless control via intelligent commutation tuning for brushless DC motor," IEEE Proc.-Electrical Power Application, Vol. 146, No. 6, pp. 678~684, 1999.
- [4] G.-J. Su and J. W. McKeever, "Low cost sensorless control of brushless DC motors with impressed speed range," IEEE Applied Power Electronics Conference, pp. 286~292, 2002.

저 자 소 개



송중호(宋重鎬)

1957년 1월 30일생. 1980년 서울대 전기공학과 졸업. 1982년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1993년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(공학박). 1995~1996 미국 Wisconsin Univ. 객원연구원. 1982~1985 이화전기 개발실. 1985~2002년 한국과학기술연구원 지능제어연구센터 책임연구원. 2002~현재 서울산업대 전기공학과 조교수. 당 학회 편집이사.