

EV용 브러시리스 직류 전동기의 센서리스 드라이브 개발에 관한 연구

배종표*, 김종선*, 서문석*, 유지윤*, 최욱돈**, 전세봉**
고려대학교*, (주)현대중공업**

A Study on the Development of Sensorless Drive System for Brushless DC Motor of Electrical Vehicle

Jong-Pyo Bae*, Jong-Sun Kim*, Mun-Seok Seo*, Ji-Yoon Yoo*,
Uk-Don Choi**, and Se-Bong Jeon**
Korea University*, Hyundai Heavy Industries CO.,LTD**

ABSTRACT

Generally, brushless DC motor(BLDCM) driving system uses hall sensors or encoders as the mechanical position or speed sensors. It is necessary to achieve the informations of rotor position for driving trapezoidal type brushless DC motor without any position sensor.

This paper proposes a sensorless driving system with rotor absolute position detector circuit which acquires both commutate phase and commutate time by analyzing motor phase voltages. Proposed system is applied to a 10k[W] rating motor which actually used in electrical vehicles of HONDA co.,ltd. The experimental results will show the validity of the proposed system and the practical use of proposed sensorless drive algorithm.

1. 서 론

브러시리스 전동기(brushless motor)라 함은, 그 이름에서 말해주듯이, 직류 전동기나 교류 동기 전동기(synchronous AC machine)등의 회전자 권선을 전원과 연결하기 위한 브러시(brushes)와 슬립 링(slip rings) 또는 기타의 기계적 정류장치가 없는 전동기를 의미한다.^[1] 영구자석 브러시리스 직류 전동기(Permanent magnet BLDCM)는 타 전동기들에 비해 소음이 작고, 효율이 높으며 여자에 필요한 요소들이 작아 제어시스템을 간소화시킨다는 기구적인 장점을 가지고 있다. 또한, 회전자가 영구자석인 이유로 부가적인 정류자가 필요하지 않으므로, 수명이 오래가고 제어가 용이하며 부피가 작아져 소형화가 가능할 뿐만 아니라 회전자의 발열이 상대적으로 적어 냉각이 용이하다.^[2, 3]

본 논문에서는 브러시리스 직류전동기의 구동에 필수

요소인 홀 센서(hall sensor)의 이용 환경상의 제약점을 극복하기 위한 센서리스 운전에 초점을 맞추어, 기존 센서리스 운전이 회전자 여자 시점과 위치를 간접적으로 검출하였던 점을 보완한 회전자의 절대위치 검출 알고리즘을 제안함과 동시에, 제어기의 부담을 줄여주고 속도 추종능력을 향상시킨 효율적 여자 시점 검출 알고리즘을 제안한다.

2. 본 론

2.1 구형과 브러시리스 직류 전동기의 구동원리^[4, 5]

브러시리스 직류 전동기 구동시 a, b, c의 각 상에 그림 1의 (a), (b)와 같은 쇠교자속과 역기전력이 각각 발생하며, 이때 역기전력이 평탄한 구간에 대해서 그림 1 (b)의 빗금친 것과 같은 전류를 해당 상에 흘려주면, 각 상에는 그림 1 (c)와 같은 토크가 발생하게 되고, 전동기의 출력 토크는 각 상의 토크를 합한 그림 1 (d)와 같은 토크가 발생하게 된다. 이와 같이 역기전력이 평탄한 구간에 전류를 흘려줌으로써 전동기의 토크는 모든 구간에서 그 크기가 일정하게 되고, 전류 대 토크가 선형성을 갖게 된다. 구형과 브러시리스 직류전동기는 위와 같은 원리에 의해서 구동이 되므로 역기전력의 평탄한 구간을 검출하는 것이 필요하다. 그림 1의 각 상에 유기되는 역기전력은 전동기의 회전자인 영구자석의 위치에 의해서 결정되어다. 따라서 회전자의 위치에 의한 역기전력의 평탄한 구간을 검출하여 전동기의 구동이 이루어지며, 이를 위하여 일반적으로 홀 센서(hall sensor)가 사용되어진다. 일반적인 브러시리스 직류 전동기의 구동 시스템은 크게 인버터, 전동기, 제어기로 구성되어 있다. 그림 2는 일반적인 구형과 브러시리스 직류전동기 구동 시스템을 나타내고 있다. 전동기 부분에 있는 홀 센서(Hall Sensor)가 회전자의 위치를 검출하고 이 신호로부터 회전자의 위치에 따라 각상에 적절한 전류가 흐르도록 인버터의 스위칭 소자를 스위칭 시켜 주게된다.

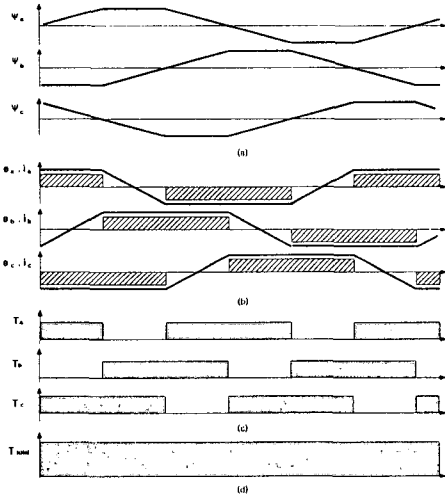


그림 1 구형파 브러시리스 직류전동기 구동시
 (a) 각상의 쇄고자속 (b) 역기전력 및 전류
 (c) 각상의 토크 (d) 전동기 발생토크
 Fig. 1 Waveforms of (a) Flux of each phase, (b) Back e.m.f and Current, (c) Torque generated in each phase, (d) Total Torque when driving a trapezoidal BLDC motor

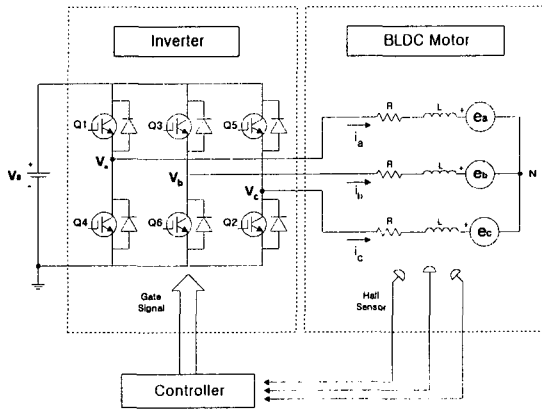


그림 2 구형파 브러시리스 직류전동기의 구동시스템 등가회로
 Fig. 2 Equivalent circuit of driving system a trapezoidal brushless DC motor

표 1은 그림 2의 구동 시스템으로 3상 2여자, 선단부 유니폴라 PWM 방식으로 전동기를 구동시킬 경우 각 구간에서 회로 상태를 나타내고 있다.

2.2 제안한 BLDCM의 센서리스 운전 원리

구형파 BLDC 전동기의 센서리스 운전의 성능을 좌우하는 것들은, 초기 회전자 위치의 검출과, 각 상의 여자(commutation) 시점의 검출, 그리고 각 도통 시점에 여자 되어야하는 정확한 상의 결정이다. 이 세 가지 요소중 어느 한가지만이라도 개선된다면, 센서리스 운전의 성능은 보다 확연히 향상된다. 그림 3은 제안한 브러시리스 직류전동기 센서리스 구동 시스템을 보여주고 있다.

표 1 3상 2여자, 선단부 유니폴라 PWM 방식으로 전동기를 구동시킬 경우의 각 구간에서의 회로 상태
 Table 1 Circuit Status for each period driving motor in the way 3Phase - 2Conduction, On-Going Unipolar PWM

	M1 0°~60°	M2 60°~120°	M3 120°~180°	M4 180°~240°	M5 240°~300°	M6 300°~360°	M1
역기전력							
전류							
Active Phase	A, C	B, C	C, A	C, A	C, B	A, B	A, C
Inactive Phase	B	A	C	B	A	C	B
Conduction Path	↻	↻	↻	↻	↻	↻	↻
PWM Switch	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q1	Q2
Turn-On Switch	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q1
Freewheeling D iode	U5	U6	U1	U2	U3	U4	U3

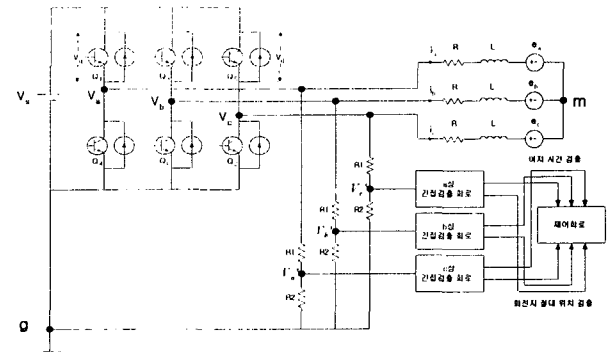


그림 3 회전자 절대위치 검출회로를 이용한 구형파 브러시리스 직류 전동기 구동 시스템
 Fig. 3 Trapezoidal BLDC motor driving system using indirect detecting circuits of absolute rotor position

그림 3에서, 전동기의 역기전력 신호로부터 검출한 시간 및 위치정보는 전기적 절연을 거쳐 주 제어회로로 입력되고, 이 정보로부터 제어회로는 전동기의 속도와 가·감속 상황을 판단하게되며, 다음 제어명령에 필요한 파라미터(parameter) 값들을 연산한 후 제어에 반영하게 된다.

그림 4는 그림 3에 보인 시스템과 전동기 등가회로를 함께 보인 그림이다. 그림에서 알 수 있듯이 실제 검출되어지는 신호는 각 상의 단자전압인 V_a, V_b, V_c 의 전압강하한 값인 $V_{a'}, V_{b'}, V_{c'}$ 이다. 매 순간의 a, b, c 상과 a', b', c' 상의 전압간의 상관관계는,

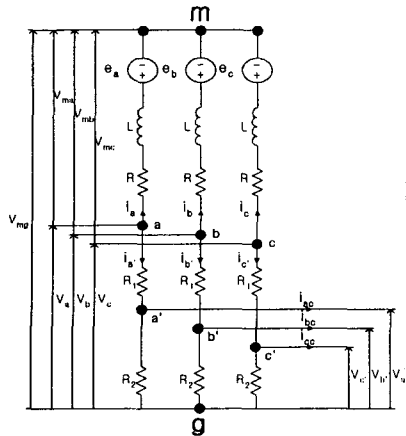


그림 4 제안한 회전자 절대위치 간접검출단 및 전동기의 등가회로
 Fig. 4 Equivalent circuit of proposed indirect detecting ports of absolute rotor position

$$v_{a'g} = v_{a'} = R_2 i_{a'}$$

$$= v_a - R_1 i_{a'}$$

$$= \frac{R_2}{R_1 + R_2} v_a$$

$$v_{b'g} = v_{b'} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} v_b$$

$$v_{c'g} = v_{c'} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} v_c$$

와 같이 되므로, R_1 과 R_2 의 적절한 선정으로 단자전압 v_a, v_b, v_c 와 동일한 형태의 신호를 간접검출 회로 단으로 보낼 수 있다. 여기서, 검출단으로 흘러가는 전류 i_{ac}, i_{bc}, i_{cc} 는 $i_{a'}, i_{b'}, i_{c'}$ 에 비해 1/20정도로 매우 작은 값이므로, $i_{ac} = i_{bc} = i_{cc} = 0$ 으로 가정하였다.

그림 5는 본 논문에서 제안하는 회전자 절대위치의 간접검출을 구현한 회로이며, 그림 6은 이 회로의 각 단전압을 비교기 출력단까지 표시한 것이다. 그림 5에서 각 상의 단자전압(그림 6의 (a))은 R_2 에서 전압강하되어 전달되어지고, 다시 고주파 스위칭 성분과 dc 성분을 제거함으로써 그림 6의 (b)와 같은 형태로 비교기(LM2901)로 입력되어진다. 비교기 출력신호는 그림 6의 (c)와 같은 모양을 가지게 되며, 전기적 절연을 거쳐 제어기 입력단으로 들어가게된다. 그림 6의 (d)는 전동기의 홀센서 신호를 보인 것으로, 그림 6의 (c)와 (d)를 비교해 볼 때 동일한 형태를 가지나 비교기 출력이 전기적으로 30° 앞서 있음을 볼 수 있다. 제안한 센서리스 알고리즘은 바로 30° 앞선 검출 신호의 반전시점에 이전 반전 시점과의 시간을 계산하여 다음 여자 시간, 즉 30° 이후의 시간을 결정하게 되는데, 기존 알고리즘과 같이

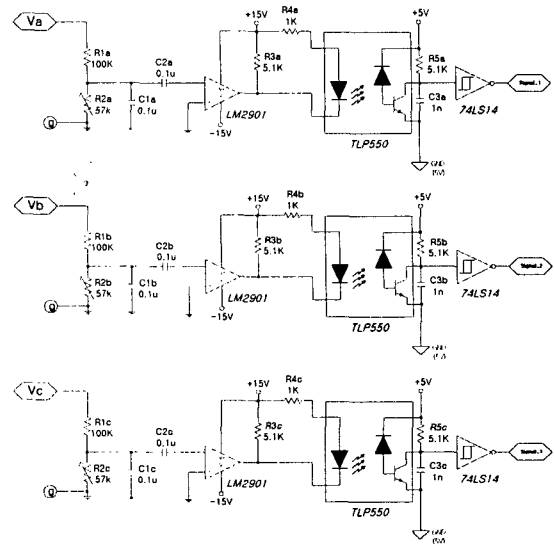


그림 5 제안한 회전자 절대위치 검출회로
 Fig. 5 Proposed indirect detecting circuits of absolute rotor position

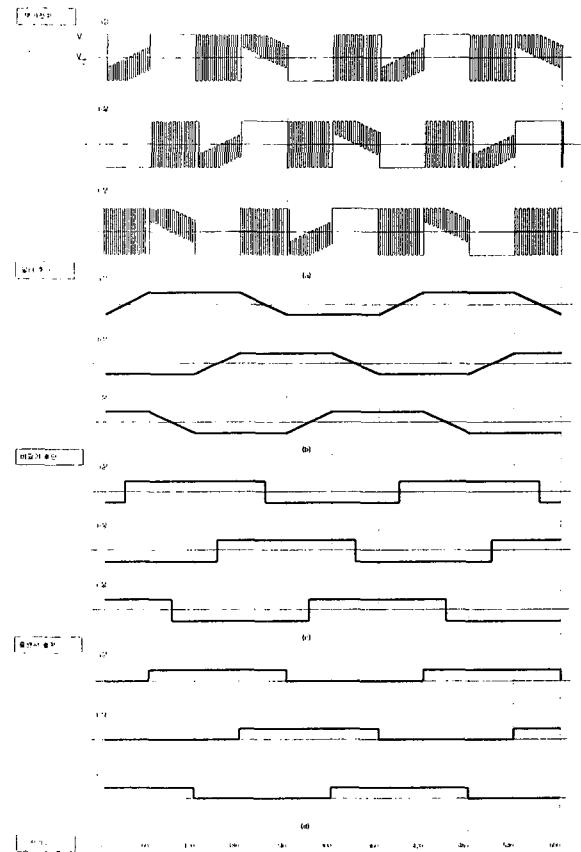


그림 6 상전압 및 간접검출 파형
 (a) 상 전압, (b) 필터 후단, (c) 비교기 후단, (d) 홀센서 출력
 Fig. 6 Voltage Waveform of (a) each phases, (b) filtered voltages of (a), (c) comparator output voltages of (b), (d) output signals of hall sensor

연산을 통한 각도 보정이 아닌, 제어기 내부 두 개의 독립 타이머의 단순 읽기·쓰기 작업만을 통해 수행 되도록 하여 제어기의 부담을 크게 줄였다. 또한 30° 이후의 여자시점에는 회전자의 절대위치(여자상)를 홀센서에서 읽어오듯이 읽어오므로, 기존의 여자 시점만을 알 수 있었던 방법에 비해 안정성 면에서 탁월한 우수성을 보인다.

2.3 전기자동차용 센서리스 운전 시스템 구성

그림 7은 제안한 센서리스 운전 알고리즘의 증명을 위해 구성한 실험 시스템의 구성을 나타내고 있다. 주 제어 연산기로는 TI(Texas Instrument)社의 TMS320F240을 사용하였으며, 인버터로는 Semikron社의 1200[V] 300[A] 용량을 갖는 SKiP 342 GD120-314 CTV를 사용하였다. 실험에 사용된 전동기는 Honda社의 2도어 해치백(2 door hatch back) 자동차인 모델(model)명 Insight에 사용된 12극 영구자석 회전자형 BLDC 전동기이다. 전동기의 자세한 사양은 표 2에 첨부하였다.

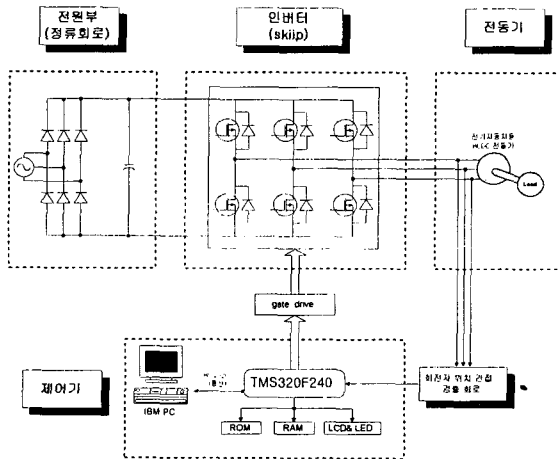
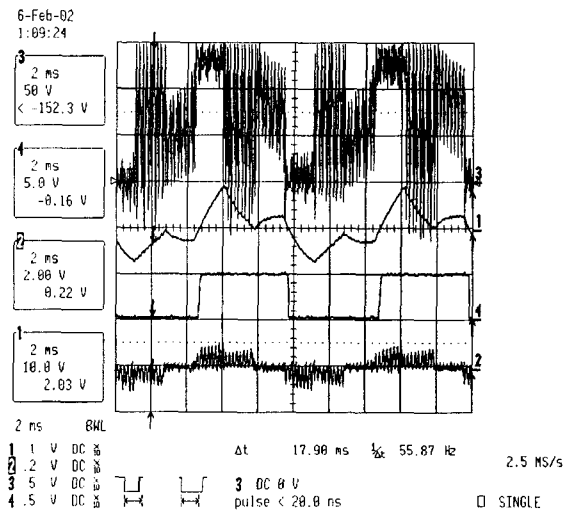


그림 7 실험 시스템 구성
Fig. 7 Topology of experiment system

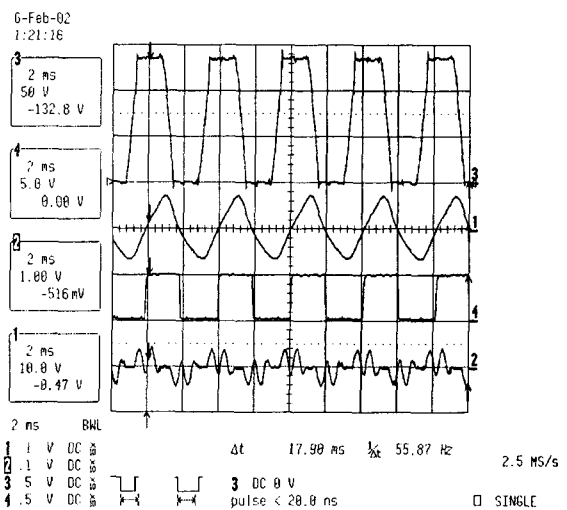
표 2 전동기 사양
Table 2 Specifications of utilized motor

항 목	단 위	Honda Insight Motor
최대 출력	kW	9.2 @ 2,000 [rpm]
최대 토크	Nm	49.0 @ 1,000 [rpm]
최고 회전수	rpm	6,000
정격전압	V _{dc}	144
극수		12
영구자석		Nd-Fe-B
냉각조건		
Stator 치수 (외경×내경×길이)	mm	254×170×40
Motor Type	mm	SPM, 분할코아

그림 8의 (a)와 (b)는 각각 제안한 센서리스 운전 알고리즘으로 표 2의 전동기를 구동시켜 1000[rpm]과, 2500[rpm] 일때의 신호를 검출한 것이다. 그림 8의 첫 번째 파형인 3번 파형은 단자전압 파형을 직류전원의 ground를 기준으로 측정된 것이며, 두 번째 1번 파형은 3번 파형을 저역·고역 필터한 것이고, 세 번째 4번 신호는 동상 신호의 비교기 출력 후 photo coupler 거친 capture 입력단, 마지막 2번 파형은 동상 전류 파형이다. 상 전류를 측정하기 위한 전류센서는 (주)한국센서의 LMA100-04로, 100[A] 4[V] 출력의 특성을 가지며, 정밀한 측정을 위해 50[A] 4[V]의 출력이 나오도록 설치하였다.



(a)



(b)

그림 8 필터 전후의 상 전압, 입력신호 및 전류 파형

(a) 1000[rpm] 센서리스 운전,
(b) 2500[rpm] 센서리스 운전

Fig. 8 Waveform of a phase voltage, filtered phase voltage, input signal and phase current while sensorless driving at (a) 1000[rpm], (a) 2500[rpm]

3. 결 론

본 논문은 전기자동차용 구형과 전류 여자 브러시리스 직류 전동기의 효율적 센서리스 운전을 목적으로, 각 상의 단자전압을 분석하여 실시간으로 각 상의 여자시점을 검출함과 동시에 여자시점에 적합한 여자 상을 회전자의 절대위치 검출을 통해 판별하는 방법을 제안하였다. 더불어, 제안한 알고리즘을 적용한 센서리스 운전 시스템을 구현하였으며, 10k[W]급 전동기를 대상으로 한 실험을 통해 제안한 기법의 타당성과 우수성을 입증하였다.

이 논문은 고려대학교 BK 21 정보 기술단과 (주)현대중공업의 연구비 지원에 의하여 연구되었습

참 고 문 헌

- [1] J.R. Hendershot and T. J. E. Miller, Design of Brushless Permanent-Magnet Motors, *Magna Physics Pub. and Oxford Univ. Press*, 1994.
- [2] James P. Johnson and M. Ehsani, "Sensorless Brushless DC Control Using A Current Waveform Anomaly", *Conf. Rec. of 1999 IEEE IAS*, pp. 151-158, 1999.
- [3] Jun OYAMA and Takashi ABE, "Sensor-less Control of a Half-Wave Rectified Brushless Synchronous Motor", *Conf. Rec. of 1995 IEEE IAS*, pp. 69-74, 1995.
- [4] 여형기, "브러시리스 직류전동기용 센서리스 드라이브 시스템 개발에 관한 연구", *고려대학교 대학원 전기공학과 석사학위 논문*, pp. 25-29, pp. 49-50, 1998년 7월.
- [5] 장항제, "구형과 브러시리스 직류 전동기용 새로운 센서리스 드라이브 개발에 관한 연구", *고려대학교 대학원 메카트로닉스 협동과정 석사학위 논문*, pp. 20-38, 2001년 2월.
- [6] N. Ertugul and P. Acarnly, "A New Algorithm for Sensorless Operation of Permanent Magnet Motors", *IEEE Trans. on Ind. Appl.*, vol. 30, no. 1, pp. 126- 133, Jan./Feb. 1994.
- [7] N. Matsui and T. Takeshita, "A Novel Starting Method of Sensorless Salient-Pole Brushless Motor", *Conf. Rec. of IEEE IAS*, pp. 386-392, 1994.
- [8] C. French, *et. al.*, "Sensorless Position Control of Permanent Magnet Drives", *Conf. Rec. of IEEE IAS*, pp. 61-68, 1995.