

3상 BLDC 전동기 구동을 위한 4-스위치 인버터의 DC-Link 전압 불평형 보상

논문
58P-4-5

DC-Link Voltage Unbalancing Compensation of Four-Switch Inverter for Three-Phase BLDC Motor Drive

박 상 훈* · 윤 용 호** · 이 병 국*** · 이 수 원[§] · 원 충 연[†]
(Sang-Hoon Park · Yong-Ho Yoon · Byoung-Kuk Lee · Su-Won Lee · Chung-Yuen Won)

Abstract - In this paper, a control algorithm for DC-Link voltage unbalancing compensation of a four-switch inverter for a three-phase BLDC motor drive is proposed. Compared with a conventional six-switch inverter, the split source of the four-switch inverter can be obtained by splitting DC-link capacitor into two capacitors to drive the three phase BLDC motor. The voltages across each of two capacitors are not always equal in steady state because of the unbalance in the impedance of the DC-link capacitors C_1 and C_2 or the variable current flowed into the capacitor's neutral point in motor control. Despite the unbalance, if the BLDC motor may be run for a long time the voltage across one of the capacitors is more increased. So the unbalance in the capacitors voltages will be accelerated. As a result, The current ripple and torque ripple is increased due to the fluctuation of input current which flows into 3-phase BLDC motor. According to that, the vibration of motor will be increased and the whole system will be instable. This paper presents a control algorithm for DC-Link voltage unbalancing compensation. The sampling from the voltages across each of two capacitors is used to perform the voltage control of DC-Link by using the feedforward controller.

Key Words : BLDC, 4-Switch Inverter, Half-Bridge Boost Converter, Voltage Compensation, Feedforward Controller

1. 서 론

브러시리스 직류 전동기(BLDCM : Brushless DC Motor)는 일반적인 직류 전동기와 유사한 전기적 특성을 가지고 있으면서, 구조적으로 영구자석형 동기전동기(PMSM : Permanent Magnet Synchronous Motor)와 유사하다. 따라서 BLDC 전동기는 전기·기계적으로 효율 및 출력 밀도가 높고, 제어하기가 상당히 용이하다. 그러므로 BLDC 전동기는 최근 들어, 가정용 전기기기 및 차량용 액츄에이터와 같은 소용량 구동 장치에서 하이브리드 자동차의 추진을 위한 대용량 구동 장치로까지 널리 사용되고 있다.

일반적으로 역기전력이 사다리꼴 형태를 지닌 BLDC 전동기의 경우, 6 스위치 인버터를 이용하여 3상 2역자 방식으로 구동하게 된다. 이 구동 방식은 전동기의 각 상당 역기전력이 반주기마다 120도의 평탄한 구간을 갖는데, 이 구간에서 구형파 전류를 인가하여 직류전동기와 유사하게 구동하는 방법이다 [1-2]. 본 논문에서는 이러한 기존의 6 스위치 인버터를 이용한 경우와 유사한 성능을 갖는 4 스위치 인버터 구동방식을

적용하여 3상 BLDC 전동기 구동 회로를 설계하였다.

4 스위치를 이용하여 3상 전동기를 구동하는 방식은 Van Der Broeck에 의해 1984년에 처음 소개되었다 [3], [7]. 이 방식은 3상 전동기를 구동하기 위해 4 스위치 인버터와 다이오드 정류기를 적용하였다. 3상 중 2상은 4 스위치 인버터의 각 상에 결선되고, 나머지 한 상은 인버터 직류단의 커패시터를 분압하여 중성점을 활용하였다. 하지만, 이러한 경우 각 커패시터의 임피던스가 불평형하거나, 전동기 제어 시 커패시터 중성점으로 유입되는 전류의 양이 일정하지 않으면 전원단에 분리된 커패시터의 전압이 불평형해지는 현상이 발생 한다 [4].

커패시터의 전압 불평형 현상에 대한 원인은 크게 다음과 같다. 인버터 입력단 DC-Link의 두 커패시터 간 임피던스 불평형과 분압된 커패시터의 중성점을 활용하면서 동작모드에 따라 중성점에 유입되는 전류량의 오차 등에 의해 중성점 전압 불평형 현상이 발생한다.

중성점 전압이 동일하지 않고 불평형 현상이 발생하면, 극단적인 경우 커패시터의 전압이 다른 한쪽으로 증가하면서 치우치는 현상이 발생 한다 [5]. 이 경우, 분압된 DC-Link 전압이 동일하지 않게 되고 두 커패시터의 전압차가 크게 발생되면, 동작모드 2와 5의 경우 이론적으로 전동기의 전류 리플치가 크게 발생하여, 전체 전동기 시스템에 악영향을 미치게 된다.

따라서 본 논문에서는 입력단 DC-Link 전압 제어와 중성점 활용이 가능한 하프브리지 부스트 컨버터와 4 스위치 인버터를 적용하여 3상 BLDC 전동기 구동 회로를 구현하였다. 그리고 인버터 직류단의 분리된 2개의 커패시터 사이에 발생하는 중성점 전압 불평형 현상을 보상하기 위해 하프브리지 부스트 컨버터의 분리된 커패시터 전압을 각각 검출하여 전황

* 정 회 원 : 성균관대학교 메카트로닉스협동과정 박사과정

** 정 회 원 : 삼성탈레스 책임연구원 · 공박

*** 시니어회원 : 성균관대학교 정보통신공학부 조교수 · 공박

[§] 비 회 원 : 성균관대학교 BK21 연구교수 · 공박

[†] 교신저자, 시니어회원 : 성균관대학교 정보통신공학부 교수 · 공박

E-mail: won@yurim.skku.ac.kr

접수일자 : 2009년 7월 6일

최종완료 : 2009년 9월 18일

보상기를 통해 직류단 전압제어를 수행함으로써 이러한 불평형 현상을 제어하였다. 또한, 다이오드 정류기대신 컨버터를 이용하여 인버터 직류단 전압을 확보하기 때문에 입력단에 역률제어를 동시에 수행하였다. 본 논문에서 적용한 방식은 실험과 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

2. 시스템의 구성 및 동작모드 해석

본 논문에서는 3상 BLDC 전동기를 구동하기 위해 4 스위치 인버터와 하프브리지 부스트 컨버터를 이용하였다. 그림 1에서와 같이 전동기 3상 중 2상은 4 스위치 인버터에 결선되고, 나머지 한 상은 인버터 DC_Link단의 두 개로 분리된 커패시터 사이에 결선된다.

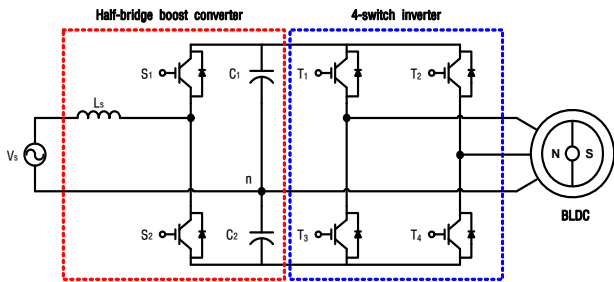
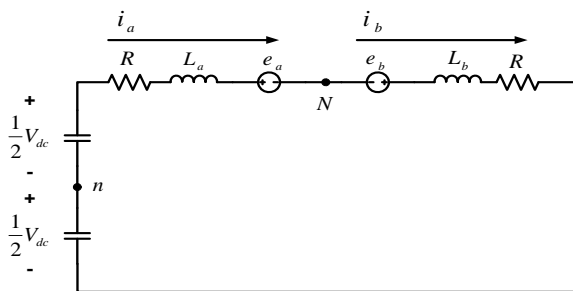


그림 1 전체 시스템 구성도
Fig. 1 Overall system diagram

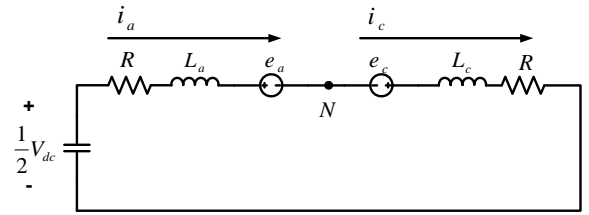
그림 1과 같이 구성된 4 스위치 인버터를 이용한 3상 BLDC 전동기는 표 1과 같이 총 6개의 동작모드로 동작한다. 동작모드 중 모드 1과 4를 제외한 나머지 모드는 2개로 분리된 커패시터의 중성점을 활용하여 통전 된다 [6].

표 1 4 스위치 인버터의 동작모드
Table 1 Operational mode of 4-switch inverter

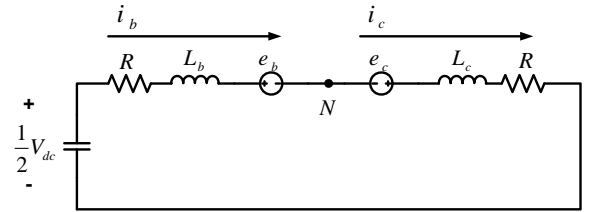
동작모드	여자상	비 여자상	통전 스위치
동작모드 1	A, B	C	T ₁ , T ₄
동작모드 2	A, C	B	T ₁
동작모드 3	B, C	A	T ₂
동작모드 4	B, A	C	T ₂ , T ₃
동작모드 5	C, A	B	T ₃
동작모드 6	C, B	A	T ₄



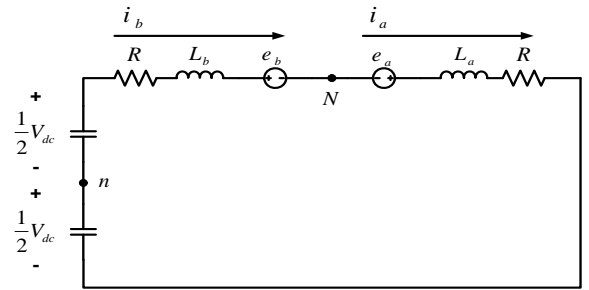
(a) 동작모드 1



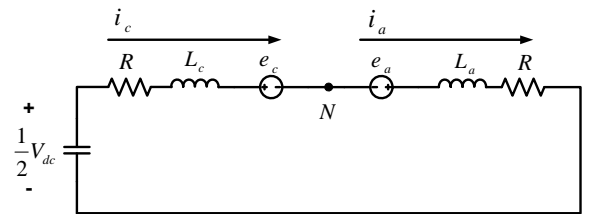
(b) 동작모드 2



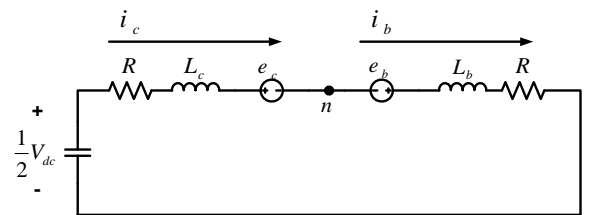
(c) 동작모드 3



(d) 동작모드 4



(e) 동작모드 5



(f) 동작모드 6

그림 2 동작모드별 등가회로

Fig. 2 Equivalent circuit of a different operational mode

그림 2에서 알 수 있듯이 4 스위치를 이용한 3상 BLDC 전동기 구동의 경우 두 개의 커패시터 전압을 활용하거나 (동작모드 1과 4), 상단 (동작모드 2와 3) 또는 하단 (동작모드 5와 6) 커패시터의 전압을 각각 활용하는 모드로 구분된다. 따라서 운전모드별 등가회로에 대한 전압 및 전류방정식은 각각 두 개의 방정식으로 전개할 수 있으며, 대표적으로 동작모드 1과 2에 대해 전개하면 다음과 같다.

- 동작모드 1

$$V_{dc} = (Ri_a + Ri_b) + (L_a \frac{di_a}{dt} + L_b \frac{di_b}{dt}) + (e_a - e_b) \quad (1)$$

$$\frac{di_a}{dt} = -\frac{R}{L}i_a + \frac{1}{2L}(V_{dc} - e_{ab}) \quad \because i_a = i_b, L_a = L_b \quad (2)$$

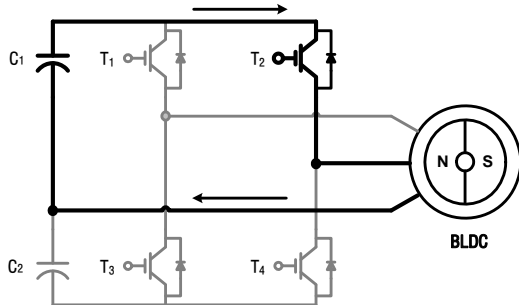
- 동작모드 2

$$\frac{1}{2}V_{dc} = (Ri_a + Ri_c) + (L_a \frac{di_a}{dt} + L_c \frac{di_c}{dt}) + (e_a - e_c) \quad (3)$$

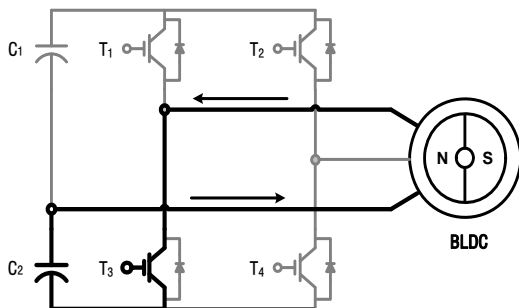
$$\frac{di_a}{dt} = -\frac{R}{L}i_a + \frac{1}{2L}(V_{dc} - e_{ac}) \quad \because i_a = i_c, L_a = L_c \quad (4)$$

위의 동작모드 1, 2와 5를 통해 알 수 있듯이 커패시터의 중성점 전압에 불평형이 발생하여, 두 커패시터 사이의 전압차가 크게 차이난다면 3상 BLDC 전동기의 동작모드에 따라 유입되는 전류의 크기가 불규칙적으로 변하게 된다. 그리고 이러한 현상은 전동기의 전체 시스템에 좋지 않은 영향을 미치게 되는 요인이 된다.

다음의 그림 3은 동작모드 2와 5의 스위치 턴-온(통전구간) 상태에서의 4-스위치 인버터와 커패시터 사이의 전력흐름을 나타낸 그림이다. 이 모드와 같이 동작하게 되는 구간에서 인버터의 직류단 커패시터의 중성점을 활용하게 되므로, 중성점 전압 불평형을 보상하지 않으면 앞서 설명했듯이 극단적인 경우 한쪽의 커패시터로 전압이 기울어지는 현상이 발생하여 전체 시스템에 악영향을 미치게 된다.



(a) 동작모드 2에서의 전력흐름도



(b) 동작모드 5에서의 전력흐름도

그림 3 동작모드 2와 5의 전력흐름도

Fig. 3 Power conduction diagram of operational mode 2 and 5

3. 커패시터의 중성점 전압 불평형 보상

Van Der Broeck에 의해 소개된 4-스위치 인버터를 이용한 3상 전동기 구동회로의 경우 다이오드 정류기의 중성점을 활용하여 시스템을 구성하였기 때문에 중성점 전압 불평형이 발생하였을 시 이를 제어하기가 어렵다. 본 논문에서는 분압된 두 커패시터 사이의 전압이 이상적으로 동일하다는 가정 하에 인버터의 구성을 최소화하는 토폴로지와 스위칭 패턴에 대한 내용을 언급하였다.

하지만, 중성점 전압이 동일하지 않고 불평형 현상이 발생하면, 극단적인 경우 커패시터의 전압이 다른 한쪽으로 증가하면서 치우치는 현상이 발생 한다 [5]. 이러한 현상으로 인하여 4-스위치 인버터를 이용하여 3상 BLDC 전동기를 구동할 시 분압된 DC_Link 전압이 동일하지 않으면, 서론에서도 언급 하였듯이 동작모드 2와 5의 경우 이론적으로 전동기의 전류 리플차가 발생하며, 전체 전동기 시스템에 악영향을 미치게 된다.

본 논문에서는 중성점 전압 불평형 현상을 해결하기 위하여 분리된 2개의 커패시터 전압을 각각 검출하여 DC_Link단 전압제어기에 전압보상하는 방법을 적용하여 불평형 현상을 제어하였다 [4]. 또한, 일반적인 다이오드 정류기를 사용하는 대신 하프브리지 부스트 컨버터를 이용하여 DC_Link단 전압제어 및 컨버터의 입력단 역률 개선을 동시에 수행 하였다.

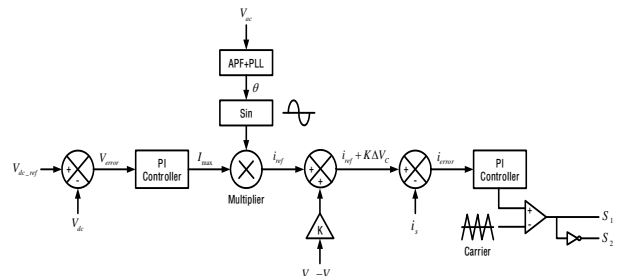


그림 4 역률개선 및 전압보상기를 이용한 중성점 전압 불평형 보상을 위한 제어 블록도

Fig. 4 Control block diagram for PFC and voltage unbalancing compensation using feed-forward controller

그림 4는 본 논문에서 사용한 하프브리지 부스트 컨버터의 전체 제어 블록도를 나타낸 그림이다. 하프브리지 부스트 컨버터의 전압제어를 위해 PI 제어기를 사용하였으며, 전역통과 필터와 단상 PLL을 적용하여 입력단 전류의 역률제어를 수행 하는데 사용하였다. 전압제어를 수행한 후 생성된 전류 제어기의 기준값에 두 커패시터의 전압을 각각 검출하여 전압차를 계산하고 전압보상 이득값을 곱하여 전압제어기를 통해 발생 된 전류 기준값에 보상하는 방식을 적용하였다.

4. 시뮬레이션 결과

본 논문에서는 PowerSim사의 PSIM 6.0 소프트웨어를 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 주 제어기는 DLL을 사용하여 제어 프로그램을 C언어 기반으로 작성하였으며, 전력변환 장치는 PSIM의 라이브러리를 사용하여 회로를 구성하였다.

다음의 그림 5는 하프브리지 부스트 컨버터의 분리된 두 개의 커패시터 사이에 전압 불평형 현상이 나타나는

시뮬레이션 결과 파형이다. 본 시뮬레이션 결과를 통해 커패시터의 중성점에 불평형이 발생하여 전압차가 발생하는 것을 알 수 있다.

그림 6은 본 논문에서 적용한 전압보상을 적용하여 분리된 두 개의 커패시터 사이의 중성점 전압 불평형 현상을 제어한 시뮬레이션 결과 파형이다. 본 시뮬레이션 결과를 통해 중성점에 오프셋 전압이 제거됨을 확인할 수 있다.

그림 7과 8은 일반 다이오드 정류기와 본 논문에서 적용한 하프브리지 부스트 컨버터를 사용할 때의 AC 입력단 전압과 전류를 나타낸 시뮬레이션 파형이다. 두 시뮬레이션 결과를 비교해보면 하프브리지 부스트 컨버터의 입력단 전압과 전류의 위상이 동상을 이루면서 거의 단위 역률에 가깝게 제어가 되고 있는 것을 확인할 수 있다.

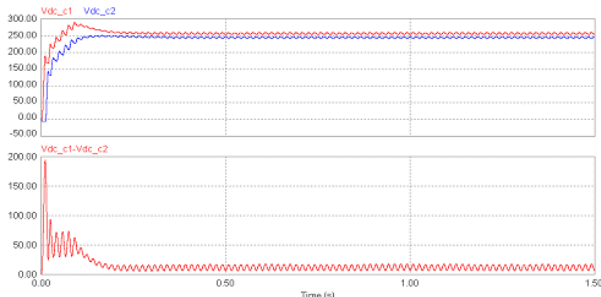


그림 5 커패시터 사이의 중성점 전압 불평형 현상 시뮬레이션 파형
Fig. 5 Simulation waveform of neutral point voltage unbalancing condition of split capacitors

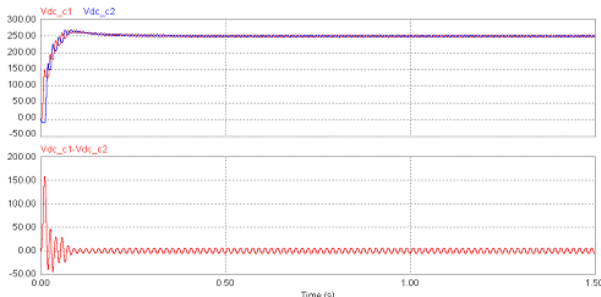


그림 6 커패시터 사이의 중성점 전압 불평형 현상 보상 제어 시뮬레이션 파형
Fig. 6 Simulation waveform of neutral point voltage unbalancing condition compensation control of split capacitors

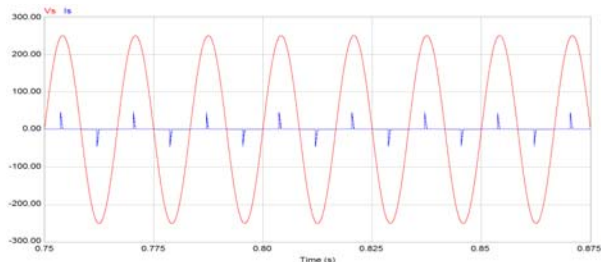


그림 7 다이오드 정류기의 입력 전압과 전류 시뮬레이션 파형
Fig. 7 Simulation waveform of input voltage and current of diode rectifier

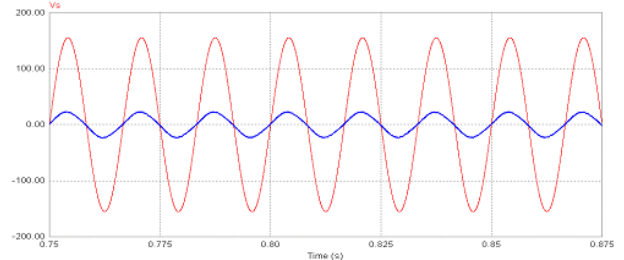


그림 8 하프브리지 부스트 컨버터의 입력 전압과 전류 시뮬레이션 파형
Fig. 8 Simulation waveform of input voltage and current of half-bridge boost converter

5. 실험 결과

그림 9는 본 논문에서 구성한 전체 시스템 블록도로 크게 컨버터부, 인버터부 그리고 제어부로 구성되어 있다. 컨버터부는 하프브리지 부스트 컨버터를 이용하여 전압 및 역률제어를 수행하고, 인버터부는 4 스위치 인버터를 사용하여 3상 BLDC 전동기를 구동한다.

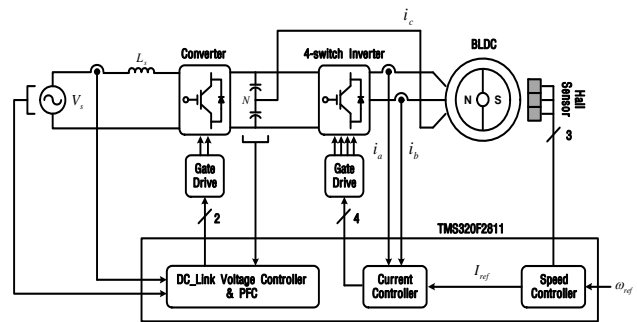


그림 9 전체 시스템 제어 블록도
Fig. 9 Overall control block diagram

다음의 표 2는 본 논문에서 설계한 전력변환회로 및 BLDC 전동기의 기본적인 사양을 정리한 표이다.

표 2 전력변환회로 및 BLDC 전동기 사양
Table 2 Specifications and parameters of power conversion circuit and BLDC motor

항목	사양
전력변환회로	
입력 전압 (V_s 최대치)	150[V]
입력 전류 (I_s 최대치)	10[A]
각 커패시터 출력 전압 (V_{c1} , V_{c2})	250[V]
DC_Link 커패시터	4700[uF]/400[V]
리액터	2[mH]
BLDC 전동기	
정격 용량	1[kW]
정격 속도	33,000[rpm]
정격 전류	3.6[A]/280[V]
고정자 저항	0.88[Ω]
극수	2

그림 10은 본 논문에서 사용한 실험세트이다. 하프브리지 부스트 컨버터와 인버터에 사용된 IGBT 스위칭 소자는 하나의 IPM을 사용하여 구성하였다. IPM 내부에 구성된 총 6개의 IGBT 중 2개는 컨버터를 구성하는데 사용하였으며, 나머지 4개는 인버터를 구성하는데 사용하였다. 그리고 컨버터와 인버터를 제어하기 위해 사용된 전압 및 전류 검출용 소자로는 컨버터단에 LAM사의 전압 센서 3개와 Hansen사의 Round shape type 전류 센서 1개를 사용하였고, 인버터단에 KOHSHIN사의 HC-PDA 시리즈 전류 센서 2개를 사용하였다. 그리고 실험에 사용된 전동기는 1kW급 3상 BLDC 전동기를 사용하였다.

전체적인 시스템 제어를 위한 주 제어기는 TI사의 제어용 32-비트 컨트롤러인 TMS320F2811을 사용하여 컨버터 및 인버터 제어를 수행하였다.

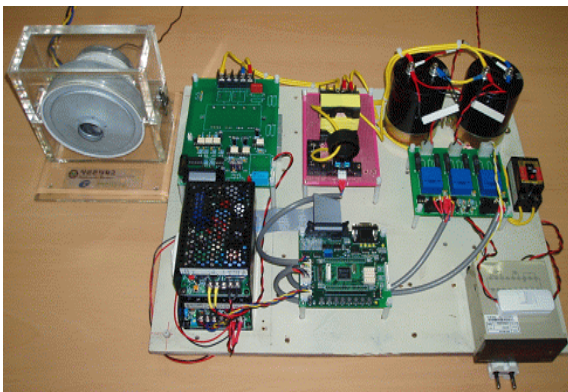


그림 10 실험 세트
Fig. 10 Experimental setup

그림 11과 12는 각각 하프브리지 부스트 컨버터의 분리된 2개의 커패시터 사이의 전압 불평형 현상이 나타난 경우와 본 논문에서 적용한 전향보상기를 사용하여 이를 제어한 실험 결과를 나타낸 파형이다.

그림 13은 하프브리지 부스트 컨버터의 입력단 전압과 전류 파형을 나타낸 실험 결과이다. 이 실험 파형에서 알 수 있듯이 입력단 역률제어가 잘 수행되고 있는 것을 확인할 수 있다.

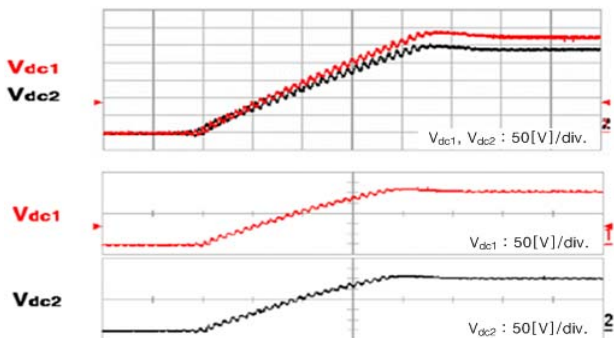


그림 11 전향보상기의 적용 전 각 커패시터의 전압 파형
Fig. 11 Voltage waveform of each capacitor before application of a feed-forward controller (Y-Axis : 50[V]/div.)

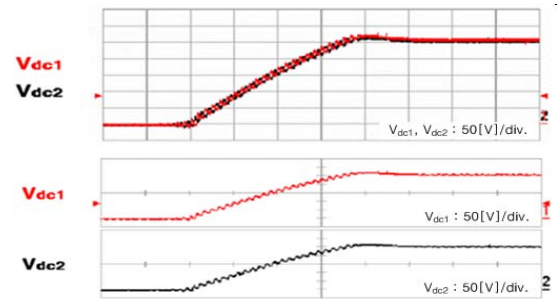


그림 12 전향보상기의 적용 후 각 커패시터의 전압 파형
Fig. 12 Voltage waveform of each capacitor after application of a feed-forward controller (Y-Axis : 50[V]/div.)

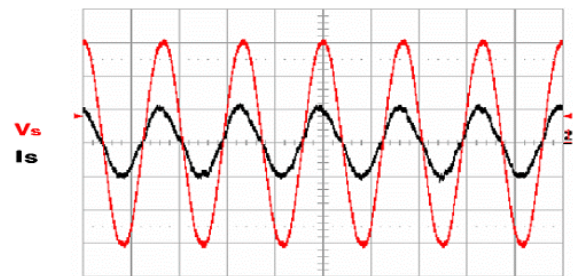


그림 13 하프브리지 부스트 컨버터의 입력 전압과 전류 파형
Fig. 13 Input voltage and current waveform of half-bridge boost converter (Y-Axis : Vs - 50[V]/div., Is - 10[A]/div.)

6. 결 론

본 논문에서는 하프브리지 부스트 컨버터와 4 스위치 인버터를 이용하여 3상 BLDC 전동기 구동 시스템을 설계 및 제작하였다. 전동기의 3상 중 2상은 4 스위치 인버터에 결선되고, 나머지 한 상은 하프브리지 부스트 컨버터의 출력단 커패시터를 분압하여 중성점을 활용하였다.

이때 한 상에 의해 발생되는 중성점 전압 불평형 현상에 의해 두 커패시터 사이의 전압차가 크게 차이난다면 3상 BLDC 전동기의 동작모드에 따라 유입되는 전류의 크기가 불규칙 적으로 변하게 된다. 그리고 이러한 원인에 의해 전체 시스템에 좋지 않은 영향을 미치게 된다. 따라서 본 논문에서는 전향보상기를 이용하여 하프브리지 부스트 컨버터의 출력단 분압된 두 커패시터의 전압을 일정하게 유지하였다. 또한, 입력단 역률제어를 통해 추가적으로 시스템의 성능을 향상하였다.

감사의 글

본 과제(결과물)는 지식경제부의 지원으로 수행한 에너지자원인력양성사업의 연구결과입니다.

참 고 문 헌

[1] T.J.E Miller, "Design of Brushless Permanent Magnet Motors", Clarendon Press. Oxford, 1994.

- [2] Takashi Kenjo, D. Eng, "Permanent Magnet and Brushless DC Motor", Sogo Electronics Publishing Company, 1984.
- [3] J.D. Van Wik, H.W. Van Der Broeck, "A Comparative Investigation of a Three-Phase induction Machine Drive with a Component Minimized Voltage-Fed Inverter under Different Control Options", IEEE Transaction on Industrial Applications, Vol. 20, No. 2, pp. 309-320, March/April 1984.
- [4] Ramesh Srinivasan, Ramesh Oruganti, "A Unity Power Factor Converter Using Half-Bridge Boost Topology", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 13, No. 3, pp. 487-500, May 1998.
- [5] J.T Boys, A.W Green, "Current-forced single-phase reversible rectifier", IEE Proceedings, Vol. 136, No. 5, pp. 205-211, September 1989.
- [6] Byoung-Kuk Lee, Tae-Hyung Kim, Mehrdad Ehsani, "On the Feasibility of Four-Switch Three-Phase BLDC Motor Drives for Low Cost Commerical Application: Topology and Control", IEEE Transaction on Power Electronics, Vol. 18, No. 1, pp.164-172, January 2003.
- [7] 박상현, 김태성, 이병국, 현동석, "4스위치 3상 BLDC 전동기의 토크 리플 저감을 위한 전류제어 알고리즘", 전력전자학회 논문지, Vol. 9, No 2, pp.126-133, April 2004.
- [8] 이정대, 박병건, 김태성, 류지수, 현동석, "BLDC 전동기 운전 특성을 이용한 고장 검출 기법 구현", 전력전자학회 논문지, Vol. 13, No 2, pp.88-95, April 2008.



이 병 국 (李秉國)

1994년 한양대학교 전기공학과 졸업. 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년 Texas A&M University 전기공학과 졸업(공학). 2002년 1월-2003년 1월 Postdoctoral Research Associate, Texas A&M University, 2003년4월-2005년 9월 한국전기연구원 산업전기연구단 전력전자그룹 선임연구원(팀장). 2006년 3월-현재 성균관대학교 정보통신공학부 조교수. 2004년~현재 IEEE Senior Member. 2007년~현재 Associate Editor, IEEE Industrial Electronics Society (IES), ICEMS 2007 및 IEEE INIELEC 2009 Secretary General, 2009년~현재 KIEE Senior Member, 현재 당 학회 영문지 간사, 전기역사전문위원회 간사, B부문 총무이사.
Tel : 031-299-4581
E-mail : bklee@skku.edu



이 수 원 (李洙原)

1991년 전북대 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 2001~2006년 군산대 BK21 계약교수, 2006~2008년 연세대 BK21 연구교수, 2008~현재 성균관대 BK21 연구교수.
Tel : 031-290-7164
Fax : 031-299-4623
E-mail : swon@skku.edu



원 충 연 (元忠淵)

1978년 성균관대학교 전기공학과 졸업. 1980년 서울대 공대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1991년 12월~1992년 12월 미국 테네시 주립대학 전기공학과 방문교수. 1988~현재 한국철도기술연구원 심사위원. 2006년~현재 한국전력공사 PQ심사위원. 2006년~현재 차세대 첨단도시철도시스템(한국건설교통기술평가원) 기술개발사업 운영위원. 2006년~현재 (주)로템 기술자문위원. 2007년~현재 도시철도기술실무위원회위원(건설교통부). 2007년~현재 월간 전기설비 편집자문위원. 현재 성균관대 정보통신공학부 교수.
Tel : 031-290-7115
Fax : 031-299-4623
E-mail : won@yurim.skku.ac.kr

저 자 소 개



박 상 훈 (朴相勳)

2007년 성균관대 대학원 전자전기컴퓨터공학과 졸업(석사). 2008년 현재 동 대학원 메카트로닉스공학과 박사과정.
Tel : 031-290-7169
Fax : 031-299-4623
E-mail : marohachi@skku.edu



윤 용 호 (尹溶湖)

2002년 성균관대 메카트로닉스공학과 졸업(석사). 2002~2003년 LG전자 연구원. 2007년 2월 동 대학원 졸업(공학). 2007년 2월~현재 삼성탈레스 종합연구소 메카트로닉스그룹 전력전자팀 전문연구원.
Tel : 031-8020-7569
Fax : 031-8020-7350
E-mail : yongho.yoon@samsung.com