

구형파 구동 BLDCM의 동기정류를 사용한 인버터 손실 저감

남명준¹, 김학원[†], 조관열²

Inverter Losses Reduction for Rectangular Drive BLDCM using Synchronous Rectification

Myung-Joon Nam¹, Hag-Wone Kim[†], and Kwan-Yuhl Cho²

Abstract

In this paper, the inverter switch losses of BLDC motor for three types of PWM methods and power devices were analyzed. When the BLDC motor is driven at low currents, the inverter switch losses for MOSFET are low because MOSFET operates like resistance. However, the inverter switch losses for IGBT are higher than MOSFET due to its large turn-off losses. Moreover, synchronous rectification switching method is adaptable because MOSFET has 2-channel. So, MOSFET can be driven with more low impedance and losses. For low power inverter with MOSFET, the power losses of unified PWM are lower than that of unipolar and bipolar PWM. Proposed method and losses analysis results are verified by examination and simulation using Matlab/Simulink.

Key words: BLDCM, Synchronous rectification, Unified PWM, Losses analysis

1. 서 론

최근 에너지 자원 부족 및 지구 온난화가 전세계적인 문제로 주목을 받으면서 산업 전반에 걸쳐 에너지 효율 향상이 요구되고 있다. 이에 따라 보급률이 높은 가전제품 분야에서는 에너지 효율 규제가 매년 강화되고 있고, 이 기준에 만족하는 제품을 출시하기 위한 기업들의 다양한 노력이 이루어지고 있다. 최근 10년 동안 냉장고 시장은 지속적인 대용량화가 이루어져 왔다. 이에 맞추어 냉장고 압축기의 효율을 높이기 위한 다양한 방법들이 제안되었다^{[1]-[5]}. 압축기의 고효율 구동을 위한 접근 방법은 전동기 손실 분석을 통한 효율 최적화와 인버터의 제어 방법 개선으로 크게 대별할 수 있다. 압축기 손실 분석을 통한 효율 최적화 방법으로 모터의 최적설계 방법이 제안되었다^[1]. 이 연구는 분석적인 방법에 근거하여 자기장, 역기전력 그리고 전력손실을 계산하고, 손

실을 줄이기 위한 접근법을 제시하였다. 또 다른 접근 방법으로 PMSM과 BLDCM의 모터 효율 및 구형파 제어와 정현파 제어의 인버터 효율을 속도에 따라 비교하여 모터 구동 방식에 따른 구동 시스템 전체 효율의 비교 연구가 진행되었다^{[2][3]}. 이 연구에 따르면, 냉장고 압축기를 구동하는 데에 BLDCM을 구형파로 제어하는 것이 더 유리하다.

모터를 구동하는 데에 있어 인버터에서의 효율 또한 모터에서만큼 중요하다. 때문에 모터 구동 조건에 따른 적절한 파워소자 선택 방법^{[4][5]} 및 다양한 조건에서의 스위칭 손실 비교에 대한 연구도 함께 이루어졌다. 모터 제어용 인버터에 주로 사용되는 IGBT와 MOSFET중, IGBT는 전압 내압이 높고, 열 손실에 강해 산업용으로 사용하기 좋지만, 턴오프 손실이 크기 때문에 운전주파수가 높아질수록 효율적인 면에서 약한 면을 갖고 있다. 반면에 MOSFET은 턴오프 손실이 IGBT에 비해 적고, 저항과 같이 동작하기 때문에 저전류 구동에서 손실을 효과적으로 줄일 수 있다. 또한 2채널을 갖고 있기 때문에 전류를 양방향으로 흘릴 수 있어 다양한 스위칭 방법을 사용 할 수 있다. 따라서 저전력으로 구동되는 가전제품들은 MOSFET의 사용을 검토하게 되었다.

모터를 구형파로 제어할 때, PWM 방법에 의해서도 다양한 형태의 손실이 발생한다. 때문에, 기존에 일반적으로 사용되는 PWM 방법들에 대한 손실 및 효율분석

Paper number: TKPE-2016-21-2-4

Print ISSN: 1229-2214 Online ISSN: 2288-6281

[†] Corresponding author: khw@ut.ac.kr, Dept. of Control & Instrumentation Eng., Korea Nat'l Univ of Transportation
Tel: +82-43-841-5322 Fax: +82-43-841-5320

¹ Research Center, VC Tech.

² Dept. of Control & Instrumentation Engineering, Korea Nat'l Univ. of Transportation

Manuscript received Dec. 21, 2015; revised Jan. 6, 2016;
accepted Jan. 18, 2016

에 대한 연구도 이루어졌다^[6]. 연구결과에 따르면 유니폴라 방식이 바이폴라 방식에 비해 스위치 동작 갯수가 적기 때문에 스위칭 손실 적게 나타나고, 그중에서도 윗상 스위치(Upper switch) PWM, 아랫상 스위치(Lower switch) PWM이 손실적인 측면에서 우수함을 보인다. 하지만, 유니폴라 PWM은 단방향 제어만 가능하므로 양방향 제어를 해야하는 경우 손실이 큰 바이폴라 방식을 사용해야만 하는 한계가 있었다. 이런 문제를 해결하기 위하여 유니폴라 방식과 바이폴라 방식의 이점을 섞은 개선된 바이폴라 PWM방법(이하 Modified Bipolar PWM)이 제안되었다^{[7][8]}. 두 개의 듀티 정보를 이용하여 PWM을 구현하는 이 방법은 유니폴라 방식과 바이폴라 방식의 스위칭 방법이 번갈아가며 동작된다. 이 때, 바이폴라 방식의 효과를 갖고 있으므로 양방향 제어가 가능하면서도 전류맥동은 유니폴라방식과 유사한 크기를 갖게 되어, 기존의 PWM방식들이 갖는 단점을 보완하게 되었다.

바이폴라 PWM 방법과 개선된 바이폴라 PWM 방법은 윗상과 아랫상 스위치가 상보적으로 On/Off를 반복하며 MOSFET을 통해 적은 손실만으로 환류전류를 처리하는데, 컨버터 분야에서는 이것을 동기 정류 방법(Synchronous rectification) 이라고 명시하며 전략적으로 사용하는 반면, 모터 제어 분야에서는 동기 정류 방법을 이용한 저손실 구동에 대해 접근이 없었다. 이러한 해석을 위해, 본 논문에서는 영구자석 동기전동기 구동시 인버터의 손실을 줄이도록 하는 PWM 방법에 대해 논하며 동기 정류 방법을 효과적으로 사용할 수 있는 방법에 대해 제시한다. 또한 손실분석을 통하여 가장 효과적인 구형과 제어 방법을 제시한다. 스위칭 소자로는 동기 정류 방법을 적용할 수 있는 MOSFET을 사용하고, PWM방법은 일반적으로 쓰이는 세 종류의 PWM방법(유니폴라<Upper switch PWM>, 바이폴라, 개선된 바이폴라 PWM)을 사용하여 그 효과를 비교한다. 손실 분석은 Matlab/Simulink 및 PSIM을 이용하여 모의해석을 실시한다. 본 논문에서 제안된 제어 방법 및 손실분석 결과는 모의해석 및 실험결과를 통해 입증한다.

2. BLDCM PWM 방식 비교

BLDCM을 구동하기 위해서 다양한 PWM 방법을 사용할 수 있으나, 모터의 구동 목적 및 손실의 크기를 고려하여 적절한 구동 방법을 선택하게 된다. 하지만 각각의 PWM 방법은 장점과 단점이 함께 있으므로 제어 성능에 큰 영향을 미친다. 본 장에서는, BLDCM을 효율적으로 구동하기 위한 PWM 방법과 저전류 구동에서 스위치 소자의 임피던스를 줄이기 위한 동기정류 방법에 대해 살펴본다. 그 후 시뮬레이션 및 실험을 통해 효과를 입증하도록 한다.

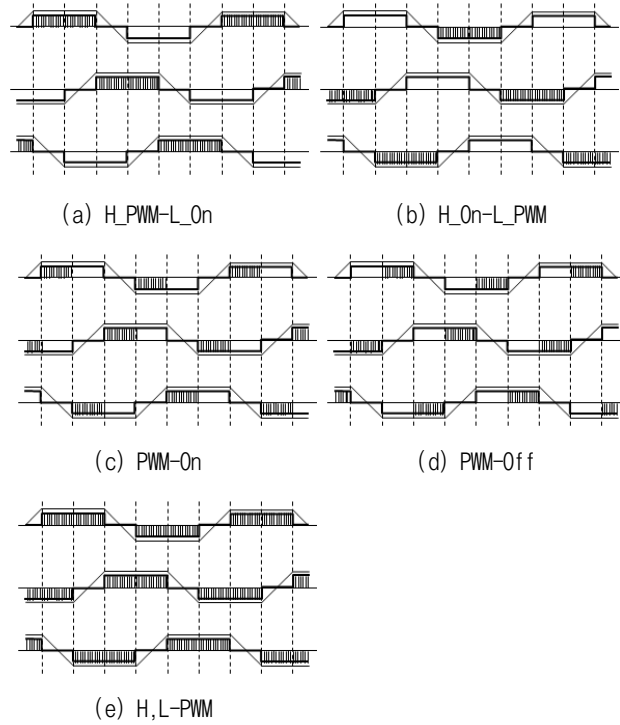


Fig. 1. Conventional PWM methods.

2.1 통상적인 BLDCM PWM 방법

BLDCM을 구동하기 위해 전통적으로 사용되어온 PWM 방법은 그림 1과 같다. 여기서 (a)-(d)는 유니폴라 PWM 방법이고, (e)는 바이폴라 PWM 방법으로 분류된다. 유니폴라 PWM 방법은 하나의 스위치만을 이용해서 전압 듀티를 조정하기 때문에 바이폴라 방식에 비해 전류 맥동이 상대적으로 작다. BLDCM의 PWM On 시 중성점 전압은 전동기의 상간 임피던스가 같고, 통전되는 상의 역기전력이 이상적인 사다리꼴 모양이면 $V_{dc}/2$ 를 갖는다^[7]. PWM Off 시는 PWM 방법에 따라 중성점 전압은 V_{dc} 또는 0이된다^[7]. 이에 따라 각 상의 전류 변화율은 아래의 식 (1)과 같다.

$$PWM_{on} : V_{an(on)} = \frac{V_{dc}}{2}, L \frac{di_a}{dt} = \frac{V_{dc}}{2} - E \quad (1)$$

$$PWM_{off} : V_{an(off)} = 0, L \frac{di_a}{dt} = -E$$

여기서 $V_{an(on)}$ 은 PWM 온(On)시 상전압, $V_{an(off)}$ 는 PWM 오프(Off) 시 상전압, E는 회전자에 의해 유도된 역기전력, V_{dc} 는 인버터의 직류 링크 전압, i_a 는 상전류, L은 모터의 인덕턴스를 의미한다.

유니폴라 PWM 방법에서 PWM 온과 오프시 인덕터에 걸리는 전압의 변동분은 아래의 식과 같다.

$$\therefore \Delta V = V_{an(on)} - V_{an(off)} = \frac{V_{dc}}{2} \quad (2)$$

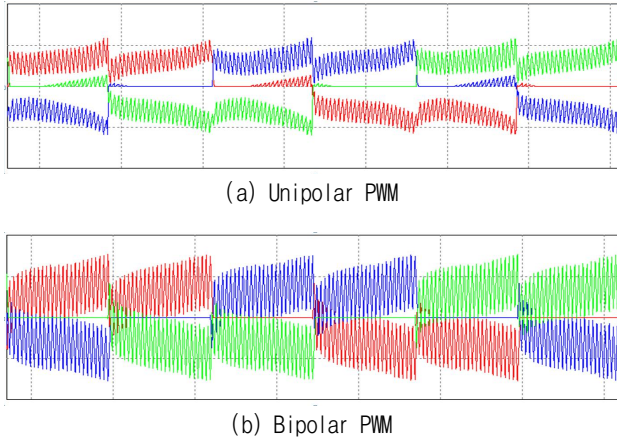


Fig. 2. Current waves of conventional PWM methods.

여기서 ΔV 는 PWM 온,오프 간 상전압의 전위 변화를 의미한다.

반면에 바이폴라 PWM 방법은 PWM 온, 오프 시 $\pm V_{dc}/2$ 의 전위를 갖는 중성점을 갖고, 권선에 인가되는 전압 및 변화량은 식 (3)와 같다.

$$\therefore \Delta V = V_{dc} \quad (3)$$

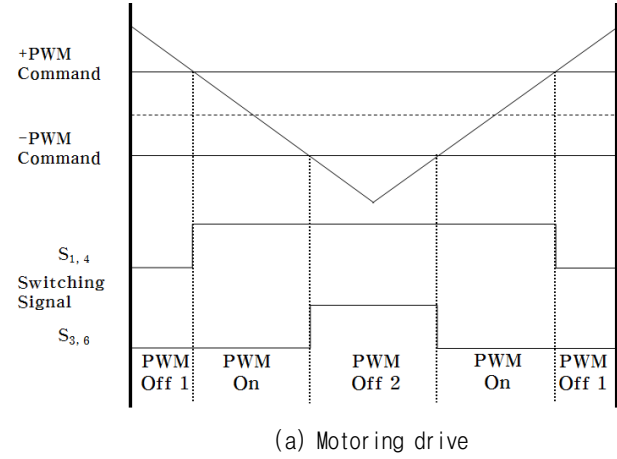
식(3)의 바이폴라 PWM 방법에서 상전압은 $V_{dc}/2$ 와 $-V_{dc}/2$ 의 양극성 전압임을 알 수 있는데, 이를 통해서 전동기의 인가전압의 방향을 쉽게 바꾸어 정·역 회전이 요구되는 응용에 쉽게 활용이 가능하다. 반대로 유니폴라 PWM 방법은 식 (1)에서 알 수 있는 바와 같이 상전압이 단극성이므로 역방향 제어 시 구동 로직을 바꾸어야 함으로 정역 회전 용도에 적용하기 어렵다.

아래의 그림 2는 각 PWM 방식 별 전동기의 전류 맥동을 나타내었다.

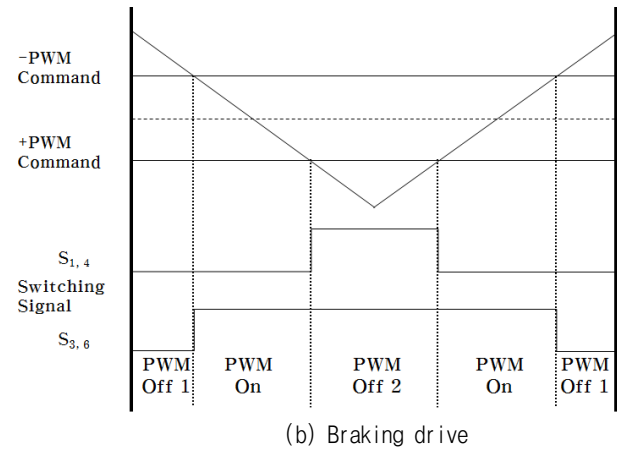
그림 2(a)는 유니폴라 PWM 시 전류맥동을 그림2(b)는 바이폴라 PWM 시 전류맥동을 보이는데, 바이폴라 PWM 시 상전압 변화가 유니폴라 PWM 방법 보다 크기 때문에, 전류맥동 또한 보다 큰 값을 갖게 된다. 이러한 전류맥동은 전동기 내부에서 철손으로 인한 에너지 손실을 유발하고, 소음 및 진동을 발생시키게 된다. 따라서 전동기의 양방향 제어를 하기 위해서는 큰 전류맥동과 이로 인한 손실을 안고가야 하는 문제가 있음을 알 수 있다.

2.2 개선된 바이폴라 PWM

본 논문에서는 위 절에서 언급한 유니폴라, 바이폴라 PWM의 단점을 보완하기 위해서, 두 PWM방법의 단점을 보완하는 개선된 바이폴라 PWM을 사용하도록 한다 [7]. 개선된 바이폴라 PWM은 하나의 듀티 정보를 이용하여 PWM을 조절하는 기존 방법들과는 다르게 두 개의 듀티정보를 사용한다. 그림 3의 (a)와 (b)를 보면, +PWM 명령과 -PWM 명령을 이용하여 스위칭 듀티를



(a) Motoring drive



(b) Braking drive

Fig. 3. Modified bipolar PWM switch signals.

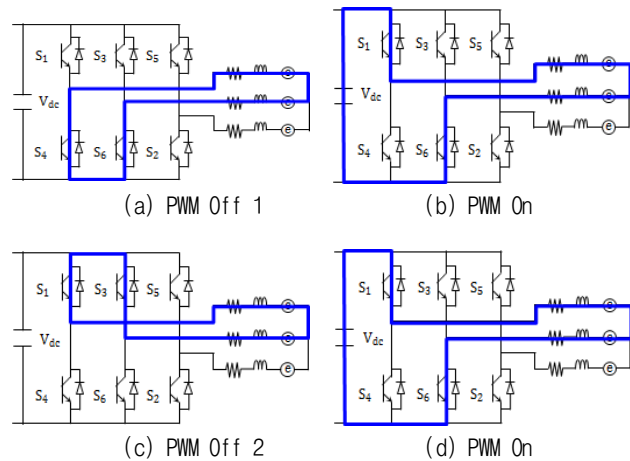


Fig. 4. Switching state of modified bipolar PWM in motoring mode.

결정하는 것을 볼 수 있다. 듀티 정보가 반송파와 일치함에 따라 위상 스위치(S_1, S_4)와 아랫상 스위치(S_3, S_6)는 서로 상보적인 스위치 동작을 하여 단락 없이 인버터를 동작시키게 된다. 또한, 반송파 한 주기 안에 듀티 정보가 비교되는 지점이 기존 PWM 방법들의 두 배이기 때문에 스위칭 동작 횟수 또한 기존 PWM 방법들의 두 배가 된다. 따라서 제어 주파수가 두 배가 되는 효과

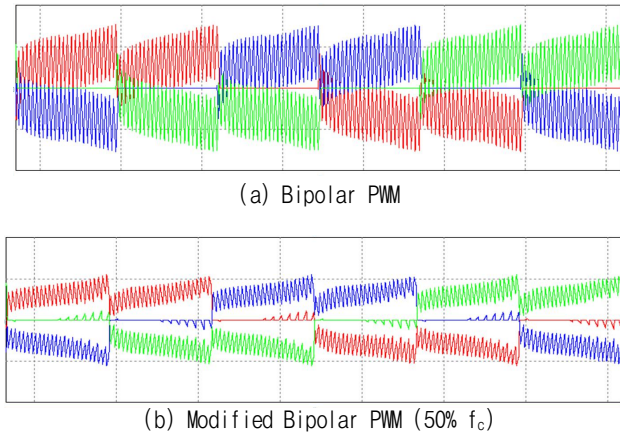


Fig. 5. Current waves of conventional PWM methods.

가 생기게 되어 상전류의 전류맥동이 작아지는 효과가 생기지만 그만큼 스위칭 손실이 늘어나기 때문에, 이를 피하기 위해서는 의도적으로 반송파의 주파수를 반으로 낮춰주어야 한다.

PWM 명령은 그림 3의 (a)처럼 정방향으로 구동 시, 바이폴라 PWM 방법의 동작과 유사하게 50% 반송파 이상의 크기를 갖는다. 반대로 50% 반송파보다 작은 PWM 명령에 대해서는 그림 3의 (b)처럼 역방향 구동을 하게 된다. 이 때 PWM 동작은 유니폴라 방법과 유사하게 동작되지만, 윗상 스위치 PWM과 아랫상 스위치 PWM이 번갈아가며 동작되는 모습을 반복적으로 보인다. 이것은 아래의 그림 4를 통해 확인 할 수 있다.

그림 4의 (a)와 (b)를 보면, S1으로만 PWM을 조절하는 윗상 스위치PWM 동작을 볼 수 있다. (c)와 (d)로부터는 S6으로만 PWM을 조절하는 아랫상 스위치 PWM 동작을 확인 할 수 있다. 개선된 바이폴라 PWM 방법의 효과는 그림 5 (b)에서 확인 할 수 있다. 그림 5 (a)의 바이폴라 PWM 방법처럼 양방향 구동이 가능하지만, 전류맥동의 크기는 유니폴라 PWM 방법과 유사하여 제어 및 손실적인 측면에서 유리한 PWM 방법임을 알 수 있다. 또한, 바이폴라 PWM 방법과 같이 위, 아래 스위치가 서로 상보적으로 동작하는 특성을 이용하여 보다 손실을 줄일 수 있는 스위칭 방법을 적용 할 수 있다.

2.3 개선된 바이폴라 PWM과 동기정류

동기정류란, 전류가 다이오드를 통해 흘러갈 때 다이오드 대신 트랜지스터로 전류가 흐르도록 스위치를 켜주는 방법이다. 이 방법을 인버터에 적용하게 되면, PWM 오프(Off) 시 환류전류가 트랜지스터의 역병렬로 연결된 다이오드를 통하여 흐를 때, 해당 트랜지스터를 함께 켜주어 낮은 임피던스로 환류전류를 트랜지스터로 흘러보내게 된다. 하지만 전류를 트랜지스터의 역방향으로 흘려주어야하기 때문에, 역전류를 흘릴 수 없는 IGBT로 구성된 인버터에는 적용할 수 없는 방법이다.

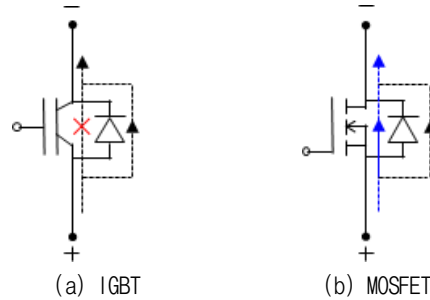


Fig. 6. Inverse current flow of IGBT and MOSFET.

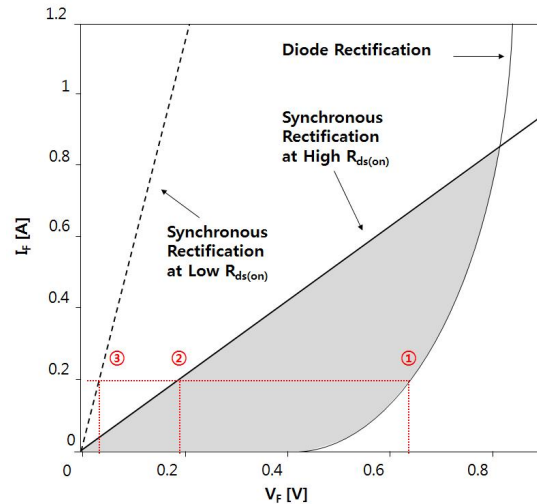
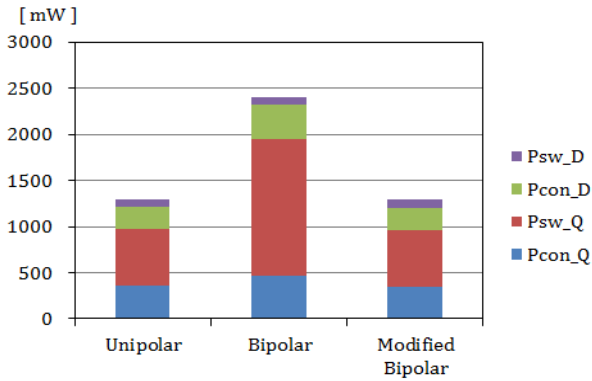


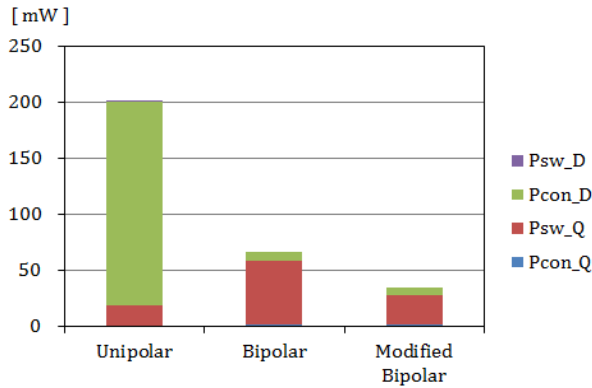
Fig. 7. Forward voltage comparison between synchronous rectification and diode rectification.

MOSFET의 경우, 역방향 전류를 흘릴 수 있으므로 동기정류 방법을 사용하여 손실을 줄일 수 있다. 역전류가 흘러가는 경로는 그림 6와 같다. IGBT는 다이오드를 통해서만 전류가 흐르고, MOSFET은 다이오드와 MOSFET 모두를 통해서 전류가 흐르게 되어 동기정류가 가능하게 된다.

그림 7은 MOSFET을 통해 역전류가 흐를 때의 전류 및 전압을 나타낸 그림이다. 0.2A의 전류를 흘리기 위해서 다이오드 정류 방법은 ①번 위치에서 만큼의 전압 강하와 전력 손실이 발생하게 된다. 반면, 동기 정류 방법은 ②, ③번 위치와 같이 다이오드 정류 방법에 비해 낮은 전압 강하만으로 0.2A를 흘릴 수 있어 손실 또한 적게 발생하지만, 전류가 커짐에 따라 저항성분에서 소비되는 손실 또한 증가하여 그 효과는 차츰 줄고, 일정 수준 이상의 전류가 흐르게 되면 오히려 그 효과는 반감되기 시작한다. ②, ③ 위치의 차이는 $R_{ds(on)}$ 에 의해서 발생하여 $R_{ds(on)}$ 이 작을수록 동기 정류 방법이 다이오드 정류 방법보다 손실이 적게 발생하는 영역이 넓어지게 된다. $R_{ds(on)}$ 은 MOSFET의 내압의 영향을 받는 부분이므로 작은 내압을 갖는 MOSFET일수록 작은 $R_{ds(on)}$ 로 인해 더 큰 동기정류 효과를 기대할 수 있다. 스펙에 따라 최대 전류를 흘려도 효과를 볼 수 있는 경우도 있다.



(a) Loss classification of IGBT



(b) Loss classification of MOSFET

Fig. 8. Loss analysis at low current.

2.4 저손실 구동을 위한 BLDCM PWM 방법

본 절에서는 앞 절에서 다룬 내용들을 종합하여 저손실 구동을 위한 BLDC 모터 제어방법을 제안한다.

환류전류를 다이오드 및 트랜지스터로 함께 도통시켜 처리하는 동기정류 방법은 저전류 구동에서 효율을 높이기 위한 핵심 요소이다. 그러기 위해 듀티명령 변화에 의한 스위칭 동작에서 윗상과 아랫상의 상보적인 스위치 동작은 필수적이다. 때문에 한 상의 스위치만을 이용하여 모터 인가 전압을 조정하는 종래의 유니폴라(Unipolar) PWM 방법에서는 동기정류 효과를 기대할 수 없다. 반면에 윗상과 아랫상 스위치 모두를 제어하는 바이폴라(Bipolar) PWM과 개선된 바이폴라 PWM 방법에서는 상보적인 스위치 동작으로 인해 동기정류 효과가 발생하게 된다. 그중에서도 개선된 바이폴라 PWM 방법은 유니폴라 PWM 과 같이 한 상에만 스위치만 동작하여 환류전류를 처리하기 때문에 환류전류에 관계없이 스위칭동작을 계속하는 기존 바이폴라 PWM 보다 스위칭 횟수가 적어 스위칭 손실에서 적은 손실을 보이며, 그 효과는 그림 8에서 확인 할 수 있다.

그림 8에서 Psw_D는 다이오드의 턴 온, 오프 시 스위칭 손실, Pcon_D는 다이오드의 컨덕션 손실, Psw_Q는 스위치의 스위칭 손실, Pcon_Q는 스위치의 컨덕션 손실을 의미한다. 저전류 구동에서의 IGBT 손실을 나타

내는 그림 8(a)에서 가장 큰 손실은 전류 꼬리에 의한 Psw_Q이다. IGBT는 큰 턴 오프 스위칭 손실 때문에 전체적인 손실이 증가하게 된다. 반면에 그림 8(b)의 MOSFET은 스위칭 손실이 IGBT에 비해 적다. 또한, 스위치 온 시 저항과 같이 동작하는 MOSFET의 특성에 의해 저전류 구동에서 Rds(on)크기와 전류 크기에 따라 MOSFET의 손실은 현저히 작은 크기를 보인다.

MOSFET의 손실 중 유니폴라 PWM방법은 환류전류를 다이오드를 통하여 흘리기 때문에 다이오드의 컨덕션 손실이 크게 발생하게 된다. 이 손실을 효과적으로 줄이기 위해서 동기정류 효과를 사용하게 되면 Bipolar PWM방법과 개선된 Bipolar PWM 방법과 같이 다이오드의 컨덕션 손실이 크게 줄게 된다. 대신 스위치의 컨덕션 손실이 늘게 되지만, 전체적인 손실이 감소하기 때문에 동기정류를 사용하는 것이 더 유리하다. Bipolar PWM과 개선된 Bipolar PWM간의 손실량 차이는 스위칭 동작 개수에 따른 트랜지스터의 스위칭 손실 차이와 전류 맥동에 따른 컨덕션 손실 차이에서 발생하게 되어, 스위칭 동작 개수가 적고 전류 맥동이 작은 개선된 바이폴라 PWM이 작은 손실량을 보인다. 이 경우 작은 Rds(on)을 통한 적은 손실을 기대하기 위해 내압이 낮은 MOSFET을 사용한다면 동기 정류 효과로 인해 컨덕션 손실을 최소화 할 수 있게 된다. 따라서 저전류로 모터 구동 시, 인버터 손실을 효과적으로 줄이기 위해서는 MOSFET을 사용하여 적은 컨덕션 손실만으로 모터를 구동해야하고, 개선된 Bipolar PWM 방법을 이용하여 동기정류 효과를 통한 다이오드 손실 저감, 스위칭 개수 감소를 통한 스위칭 손실을 저감해야 한다.

3. 모의 해석

실제 실험에서는 인버터에서 발생하는 손실이 어떤 요인에 의해서 발생하였는지 측정하기 쉽지 않으므로, 시뮬레이션을 통해 손실의 종류를 분류하도록 한다. 또한 인버터에서 소모되는 순시 전력의 크기를 측정하여 PWM 방법에 따라 어떠한 변화를 보이는지 알아보도록 한다. 손실분석에는 Matlab/Simulink와 PSIM을 함께 사용하여 Simulink로 모터 제어기 구성 및 PWM 방법에 변화를 주었고, PSIM의 손실분석틀을 이용하여 인버터 손실을 추정하였다. 또한, 동기정류로 인한 효과를 확인하기 위해 MOSFET 인버터와 IGBT 인버터에 대한 모의 해석을 모두 실시하였다.

역병렬 다이오드에서 발생하는 손실은 도통손실(Conduction loss)과 스위칭손실(Switching loss)로 구분할 수 있으며 각각의 손실 추정은 식 (4)-(6)을 바탕으로 계산되었다.

$$E_{FET} = E_{con} + E_{sw} = i_d^2 R_{ds(on)} T_{on} + (E_{on} + E_{off}) f \quad (4)$$

TABLE I
CHARACTERISTICS OF MOSFET, IGBT AND DIODE

MOSFET					
Symbol	Value	Unit	Symbol	Value	Unit
t_r	58	ns	t_f	28	ns
$R_{ds(on)}$	3	m Ω			
MOSFET-diode					
Symbol	Value	Unit	Symbol	Value	Unit
V_f	1.2	V	t_{rr}	86	ns
IGBT					
Symbol	Value	Unit	Symbol	Value	Unit
t_r	30	ns	t_f	150	ns
E_{on}	160	μ J	E_{off}	295	μ J
$V_{ce(sat)}$	1.6	V			
IGBT-diode					
Symbol	Value	Unit	Symbol	Value	Unit
V_f	1.75	V	t_{rr}	180	ns
E_{rec}	70	μ J			

$$E_{IGBT} = E_{cond} + E_{sw} = V_{CE(sat)} i_c T_{on} + (E_{on} + E_{off}) f \quad (5)$$

$$E_{DIODE} = E_{cond} + E_{sw} = V_d i_d T_{on} + E_{rr} f \quad (6)$$

손실분석에 사용된 MOSFET과 IGBT 및 다이오드의 특성은 표 1과 같다.

여기서 t_r 과 t_f 는 트랜지스터의 상승 시간과 하강 시간을 의미하고, $R_{ds(on)}$ 은 MOSFET이 켜졌을 때의 드레인-소스 간 도통 저항을 의미한다. V_f 는 다이오드의 순방향 전압 강하, t_{rr} 은 역회복시간을 의미한다. E_{on} 과 E_{off} 는 트랜지스터 켜질 때와 꺼질 때 발생하는 에너지 손실 양을, $V_{ce(sat)}$ 는 IGBT가 켜졌을 때, 컬렉터와 이미터간 전압을, E_{rec} 는 다이오드의 역회복 시 발생하는 에너지 손실의 양을 의미한다. 이를 바탕으로 손실을 분석한 결과는 표 2, 3과 같은 손실분석 결과를 보이며 그림 9, 10와 같이 PWM 방법과 스위칭 소자에 따른 파형을 보인다. 그림 9과 그림 10에서 x축은 모터가 회전하는 동안의 전기 각을 나타내며, y축은 이때의 순시전력을 나타낸다. 실제 실험에서는 순시전력을 측정할 수 없어 일정 시간동안의 평균값을 측정하기 때문에 시뮬레이션에서도 한 주기 동안의 평균값을 측정하였다.

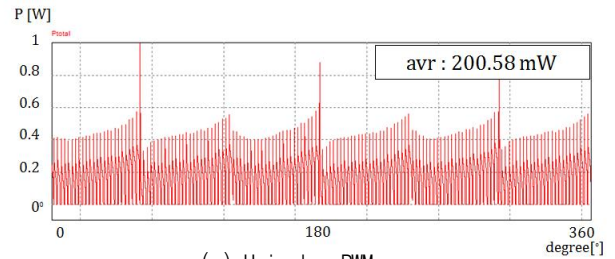
표 2는 전기적인 한 주기 동안 인버터에서 발생한 전력의 평균을 측정한 결과를 보여준다. 여기서 표 2의 MOSFET에 대한 손실분석 결과에서 유니폴라 PWM 방법에 대한 부분을 보면, 환류전류가 다이오드를 통해 흐르기 때문에 다이오드 손실이 크게 발생함을 알 수 있다. 바이폴라 PWM 방법은 동기정류 효과로 인해 다이오드 손실이 크게 줄어들고, 트랜지스터의 손실이 소량 상승함을 볼 수 있다. 이 때, 바이폴라 PWM 방법은 전류 맥동이 크기 때문에 그림 9 (b)와 같이 전력 손실의 피크값이 큰 값을 갖게 된다. 이는 큰 전류 맥동으로

TABLE II
SWITCH LOSSES FOR MOSFET (Unit : mW)

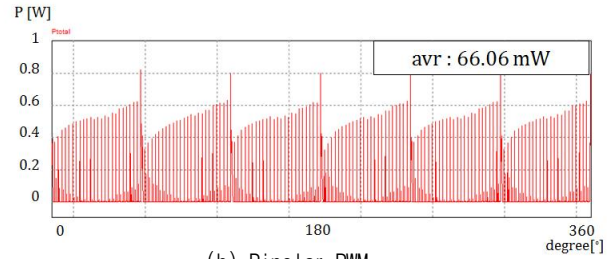
Method	P_tr	P_diode	P_total
Unipolar	15.72	198.63	214.35
Bipolar	53.15	47.12	100.27
Modified Bipolar	20.70	20.61	41.31

TABLE III
SWITCH LOSSES FOR IGBT (Unit : mW)

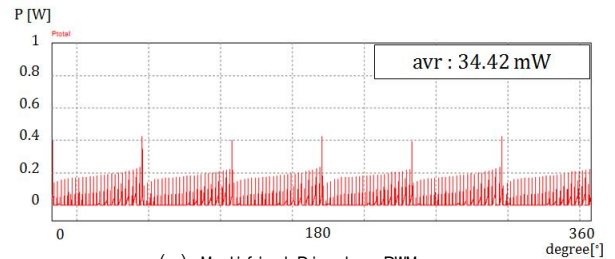
Method	P_tr	P_diode	P_total
Unipolar	967.30	330.90	1298.20
Bipolar	1946.75	456.20	2402.95
Modified Bipolar	963.78	327.51	1291.29



(a) Unipolar PWM



(b) Bipolar PWM



(c) Modified Bipolar PWM

Fig. 9. Instantaneous power analysis of MOSFET inverter at low current.

인해 인버터 손실 뿐 아니라 전동기에서의 철손을 크게 한다. 하지만 동일 시간동안 발생하는 손실의 총 량에 대해서는 유니폴라 PWM 방법보다 작은 결과를 보인다. 개선된 바이폴라 PWM 방법은 표 2와 그림 9 (c)의 결과와 같이, 손실이 줄어들음을 확인할 수 있다.

IGBT는 스위치가 켜졌을 때 컬렉터-이미터 간 발생하는 전압강하 V_{CE} 에 의해 저전류 구동에서 MOSFET보다 큰 트랜지스터 도통 손실을 보인다. 또한, IGBT의 특성상 나타나는 전류 꼬리에 의한 손실까지 더해져 표 3의 트랜지스터 손실들은 모두 MOSFET보다 큰 값을

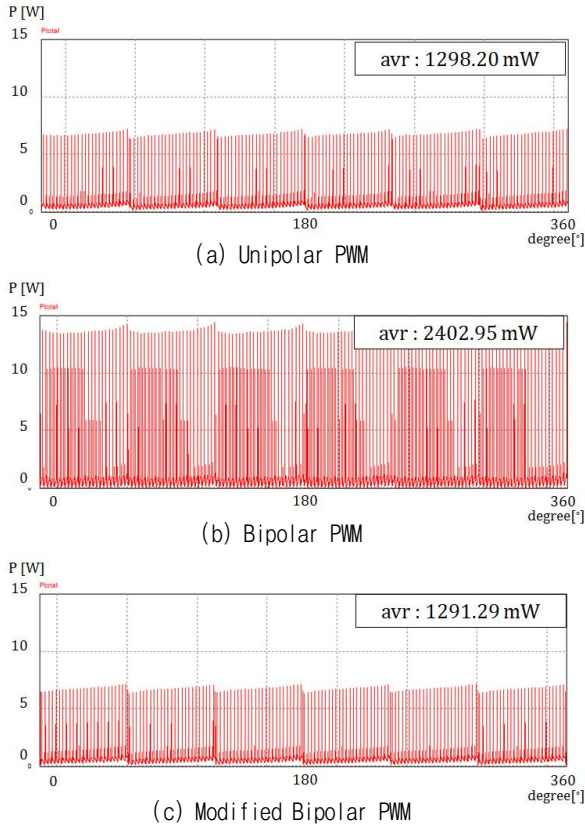


Fig. 10. Instantaneous power analysis of IGBT inverter at low current.

갖는다. 동기정류를 할 수 없는 IGBT는 다이오드 손실도 MOSFET 보다 큰 전력 손실값을 갖는다. IGBT의 손실분석 결과 내에서 전력손실의 차이를 보이게 하는 가장 큰 요인은 듀티 조정을 위한 스위치 개수이다. 표 3을 보면 유니폴라 PWM과 개선된 바이폴라 PWM의 경우 유사한 크기의 전력 손실값을 보이지만, 바이폴라 PWM 방법은 앞선 두 PWM 방법에 비해 동작 스위치 개수가 많기 때문에 트랜지스터 및 다이오드의 손실이 더 큰 값을 갖게 된다. 따라서 저전류 구동에서 동기정류 방법을 사용하기 위해 MOSFET을 사용하고 바이폴라 또는 개선된 바이폴라 PWM 방법을 사용해야 함을 확인 할 수 있다. 또한, 개선된 바이폴라 PWM을 통해 스위칭 횟수를 줄여, 더욱 손실을 줄일 수 있다.

4. 실험 결과

실험을 통한 손실 분석은 동기 정류 효과를 볼 수 있는 MOSFET 인버터에 대해서 이루어졌다. 실험의 사용된 모터의 파라미터는 표 4와 같은 SPMSM을 사용하였고, MOSFET의 파라미터는 3절에서 언급한 표 1과 같다. 그림 11은 실험에 사용된 컨트롤 및 인버터 보드, 테스트 및 부하 모터, 전력 측정기를 보여준다. 테스트 모터를 제어에는 DSP TMS320F28069를 사용하였고, 부

TABLE IV
PARAMETERS OF TEST MOTOR

Parameter	Mark	Value	Unit
Rated Power	P_{rat}	25.7	W
Rated Speed	rpm	2500	rpm
Rated Current	I_{rat}	1.62	Arms
DC link voltage	V_{dc}	24	V
number of poles	P	8	
EMF Constant	ϕ_f	7	mVsec
Phase Resistance	R_s	1.29	Ω
Phase Inductance	L_s	22	mH
PWM frequency	f_{sw}	10	kHz

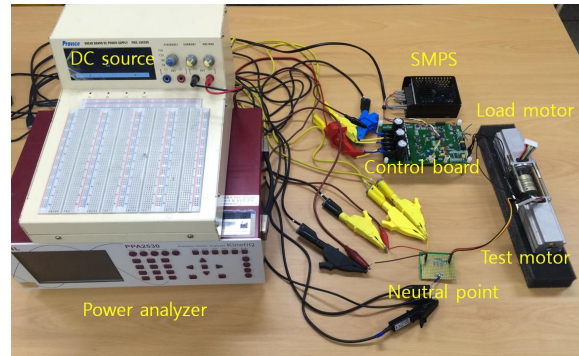


Fig. 11. Experiment set for loss analysis.

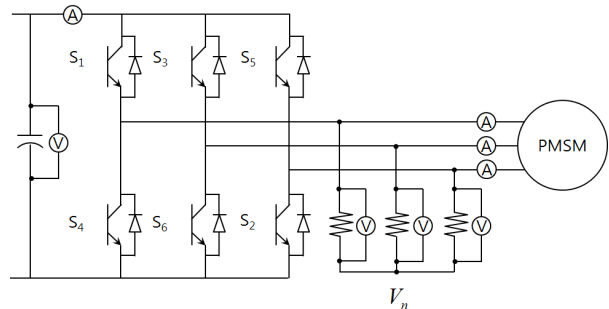


Fig. 12. Power analyzer connection for inverter loss measurement.

하 모터 및 커플링을 이용하여 테스트 모터에 가해지는 부하의 크기를 조절하였다. 인버터에서 발생하는 손실을 측정하기 위해 그림 12과 같이 전압 및 전류를 측정하고, 파워 분석기를 이용하여 모터의 전기적인 한 주기마다 DC source의 입력 전력 및 모터에 입력되는 전력을 측정하였다. 이 때 두 값의 차는 인버터에서 발생한 손실이 된다. 모터에 입력되는 전력을 측정하기 위해서는 모터의 중성점이 필요한데, 일반적으로 모터의 중성점은 외부로 노출되어있지 않기 때문에 외부에 의사중성점을 만들어 사용하였다.

그림 13의 전류파형은 각 PWM 방법으로 모터를 구동하였을 때의 상전류 파형이다. 유니폴라 PWM 에서

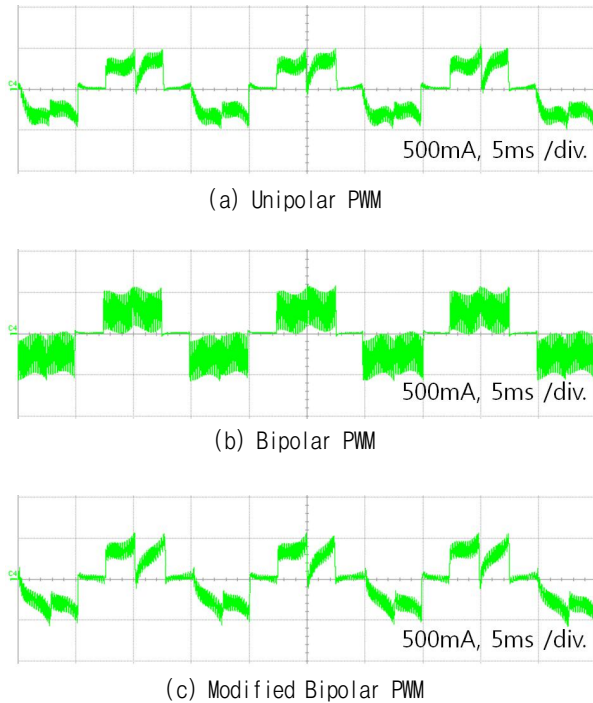


Fig. 13. Phase current waves of PWM methods.

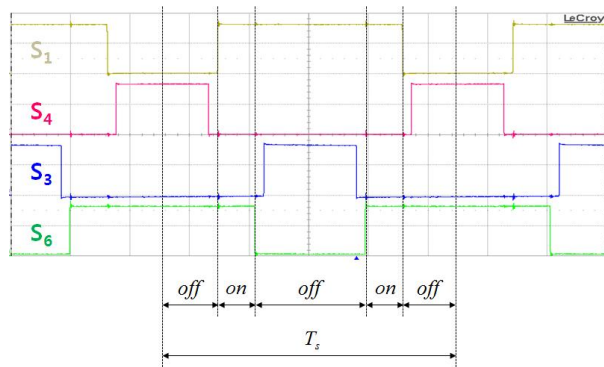


Fig. 14. Gate signal of modified bipolar PWM.

바이폴라 PWM 방법으로 변화함에 따라 전류맥동이 확연히 커짐을 볼 수 있다. 하지만 개선된 바이폴라 PWM을 사용함에 따라 전류맥동이 다시 감소하여 바이폴라 PWM 방법보다는 작고, 유니폴라 PWM 방법과는 유사한 크기의 철손을 기대할 수 있게 되었다.

그림 14은 개선된 바이폴라 PWM의 게이트 구동 신호이다. 그림에서 캐리어 주파수 한 주기 동안 게이트 구동 신호들은 각각 한번의 PWM의 동작을 하지만, U상(S1, S4)과 V상(S3, S6)이 각각의 전압 레퍼런스 갖고 엇갈리게 동작함에 따라 실제 모터에 가해지는 PWM 동작은 두 번이 됨을 알 수 있다. 또한 각각의 윗상(S1, S3)과 아랫상(S4, S6)은 서로 상보적으로 동작하며 환류전류가 흐를 경로를 만들어주게 된다. 그러하면, 환류전류는 다이오드와 MOSFET 중 임피던스가 작은 스위치로 분배되어 흐르며 발생 손실

TABLE V
EXPERIMENTAL LOSS ANALYSIS RESULT

Method	P_loss [mW]
Unipolar	214.35
Bipolar	100.27
Modified Bipolar	41.31

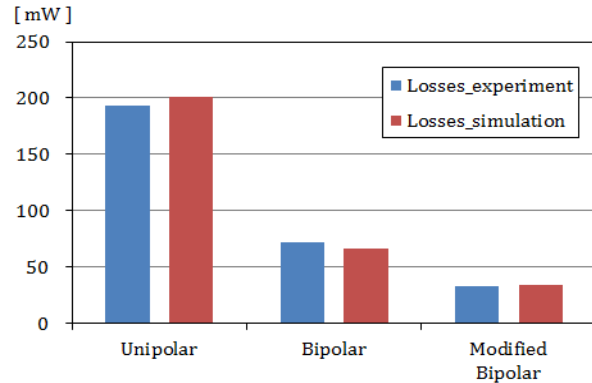


Fig. 15. Loss analysis comparison between experiment and simulation.

또한 가장 적게 발생하게 된다. 이 때 데드타임동안 한 상의 위아래 스위치는 모두 꺼지게 되는데, 환류전류를 동기정류로 처리할 수 없기 때문에 데드타임이 길어지면 손실 또한 증가하게 된다.

아래의 표 5는 각 PWM 방법으로 모터를 구동했을 때의 인버터 손실 측정결과를 보여준다.

유니폴라 PWM은 다이오드 손실로 인해 가장 큰 손실을 보인다. 반면에 바이폴라 PWM의 경우 동기정류로 인해 다이오드 손실이 줄어들게 되어 유니폴라 PWM 보다 더 많은 스위치 동작을 함에도 작은 손실을 보인다. 개선된 바이폴라 PWM은 그림 13의 (c)와 같이 전류맥동이 줄어들게 되어 맥동이 감소한 비율만큼 총 손실 또한 감소한 결과를 보인다. 실제 실험과 모의해석과의 비교는 아래의 그림 15과 같다. 이 결과로부터 PWM 방법과 동기 정류 효과로 인한 손실 저감 효과를 명확히 확인 할 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 BLDC 모터의 스위칭 손실을 저감하기 위한 개선된 바이폴라 PWM 방법을 제안하였다. 또한 BLDC모터 구동 시, IGBT 및 MOSFET 인버터의 성능 차이를 비교하고 시뮬레이션으로 그 결과를 확인하였다. MOSFET 인버터에서 PWM 방법별 손실을 분석하였으며, 이 과정에서 개선된 바이폴라 PWM 방법 및 동기정류 방법을 적용하여 그 효과를 시뮬레이션 및 실험을 통하여 입증하였다.

본 논문은 2011년도 산업통상자원부 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 에너지인력양성사업으로 지원받아 수행한 인력양성 성과입니다. (NO20134030200310)

본 논문은 2014년도 한국교통대학교 외부지원연구년 규정에 따라 (주)브이씨텍의 지원을 받아 수행한 성과입니다.

References

- [1] S. M. Jang, H. W. Cho, and S. K. Choi, "Design and analysis of a high-speed brushless DC motor for centrifugal compressor," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 43, No. 6, pp. 2573-2575, Jun. 2007.
- [2] D. S. Cha, D. G. Kim, S. T. L., D. S. Shin, G. W. Lee, and Y. C. Lim, "A study on the hybrid control method according to operation range of permanent magnet synchronous motor in compressor," in *Annual Conference of the KIPE*, pp. 316-317, Nov. 2010.
- [3] M. Miyamasu and K. Akatsu, "Efficiency comparison between brushless dc motor and brushless AC motor considering driving method and machine design," in *IECON 2011-37th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, pp. 1830-1835, Nov. 2011.
- [4] G. Wang, X. Huang, J. Wang, T. Zhao, and S. Bhattacharya, "Comparisons of 6.5 kV 25A Si IGBT and 10-kV SiC MOSFET in solid-state transformer application," in *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, pp. 100-104, Sep. 2010.
- [5] T. Zhao, J. Wang, A. Q. Huang, and A. Agarwal, "Comparison of SiC MOSFET and Si IGBT based motor drive systems," in *Industry Applications Conference, 42nd IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2007 IEEE*, pp. 331-335, Sep. 2007.
- [6] Q. Li, H. Huang, and B. Yin, "The study of PWM methods in permanent magnet brushless DC motor speed control system," in *Electrical Machines and Systems, 2008. ICEMS 2008. International Conference on*, pp. 3897-3900, Oct. 2008.
- [7] H. W. Kim, H. K. Shin, H. S. Mok, Y. K. Lee, and K. Y. Cho, "Novel PWM method with low ripple current for position control applications of BLDC motors," in *Journal of Power Electronics*, Vol. 11, No. 5, pp. 276-733, Sep. 2011.
- [8] Y. S. Jin, H. G. Shin, H. W. Kim, H. S. Mok, and K. Y. Cho, "Position controller for clutch drive system of PHEV(Plug in Hybrid Electric Vehicle)," *The Transactions of The Korean Institute of Power Electronics*, Vol. 17, No. 2, pp. 166-173, Apr. 2012.
- [9] B. H. Kang, H. S. Mok, and G. H. Choi, "Optimum torque control method for BLDC motor with minimum torque pulsation," *The Transactions of The Korean Institute of Power Electronics*, Vol. 8, No. 2, pp. 56-63, Feb. 2003.



남명준(南明俊)

1989년 5월 11일생. 2014년 한국교통대 제어계측공학과 졸업. 2014년~2015년 한국교통대 대학원 제어계측공학과 석사과정. 2016년~현재 브이씨텍 기술연구소 연구원.



김학원(金學源)

1968년 3월 30일생. 1989년 고려대 전기공학과 졸업. 1991년 한국과학기술원 전기및전자공학과 졸업(석사). 2005년 동 대학원 전기및전자공학과 졸업(공학박). 1991년~2008년 LG전자 디지털 어플라이언스 연구소 책임연구원. 2008년~현재 한국교통대 제어계측공학과 부교수. 당 학회 편집위원장.



조관열(趙官烈)

1964년 2월 20일생. 1986년 서울대 전기공학과 졸업. 1988년 한국과학기술원 전기및전자공학과 졸업(석사). 1993년 동 대학원 전기및전자공학과 졸업(공학박). 1993년~2004년 LG전자 DA연구소 책임연구원. 2004년~현재 한국교통대 제어계측공학과 교수. 당 학회 학술위원장 및 편집위원장 역임.