

스위칭 방식에 따른 BLDC Motor 구동용 인버터의 전력 손실 계산 알고리즘 개발

The Development of Calculation Algorithm of Power Loss for Inverter in BLDC Motor Drive with Switching Modes

김 상 훈* 이 영 철**
Kim, Sang-Hun Lee, Young-Cheol

Abstract

BLDC Motor is one of the widely utilizable motors in servo system. The accurate calculation of the power loss for the IGBT and Inverse diode with Bipolar and Unipolar switching modes the driving modes is important for the design of drives for their heat treatment. If it were not for temperature-sensors in devices, it is difficult to get direct power loss. so, Power losses may be modeled by computer modeling to obtain the Calculation of the Power loss for Inverter in BLDC Motor with switching modes which is presented in this paper. The computer modeling is carried out by Matlab simulation. The power loss consists of conduction losses and switching losses. Conduction losses are the source of occurrence due to The IGBT and Inverse diode currents. Switching losses are the source of occurrence due to switching on/off in the devices, and gives the dominant influence to the loss. As a result, the unipolar I mode is best in reducing the heat losses.

키워드 : 도통손실, 스위칭손실, 바이폴라, 유니폴라 I, 유니폴라 II

Keywords : Conduction loss, Switching loss, Bipolar, Unipolar I, Unipolar II

1. 서론

전력용 반도체는 1940년대 후반에 반도체 트랜지스터의 출현으로 시작하여 SCR(Silicon Contrilled Rectifier Thyristor), GTO(Gate-Turn-Off Thyristor), BJT(Bipolar Junction Transistor), MOS FET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor)를 거쳐 IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)가 출시하게 되었다.

IGBT의 특징은 Mosfet의 장점인 쉬운 게이트 구동과 BJT의 장점인 적은 도통 손실을 결합시킨 소자이다[1] 이로 인해 현재 인버터에서 각광받고

있는 소자이다.

IGBT는 Motor Drive로 사용 시 여러 가지 전동기를 사용 할 수 있는데 그중 BLDC Motor의 경우 효율 및 에너지 밀도가 높고 직류 전동기의 브러시 마멸로 인한 유지 보수가 요구되지 않으며, 직류 전동기와 같은 우수한 제어 특성의 장점을 가지고 있다[2] 따라서 본 논문은 BLDC Motor 구동시 인버터 소자인 IGBT와 Inverse diode에서 발생하는 손실을 계산하였으며, 계산된 손실로서 인버터 소자의 heat-sink의 용량을 결정할 수 있는 중요한 요인으로서 작용될 수 있다. 이는 전체 시스템의 신뢰성을 향상시킬 수 있다. 이러한 BLDC Motor 구동 시 구동회로에 대한 손실을 계산하기 위해서는 BLDC Motor만이 갖는 동작 특성을 알아야 한다. 먼저 BLDC Motor의 동작 특성은 기존의 DC Motor와 유사하며, 위치센서와 인버터의

* 강원대학교 전기공학과 교수, 공학박사

** 강원대학교 대학원 전기공학과 석사과정

반도체 소자 스위치는 직류 전동기의 브러시와 기계적 정류자 역할을 대신한다. BLDC Motor를 구동하기 위해서는 전류의 파형을 준 구형파로 만들어야 하며, 전기 각으로 60도 회전할 때마다 상전류 전환을 행하는 3상 2여자 방식으로 구동되어야 하기 때문에 전동기를 구동하기 위한 인버터가 요구되어진다[3]. 인버터는 크게 두 가지로 CR-PWM VSI(Current Regulation Pulse Width Modulation Voltage Source Inverter)와 CR-PWM CSI(Current Regulation Pulse Width Modulation Current Source Inverter)로 나누어 질수 있다. 본 논문에서는 구동 시스템인 CR-PWM VSI을 사용하여 BLDC Motor를 구동하였으며, BLDC Motor의 스위칭 제어기법을 파악하여 각 제어기법 방식에 따라 인버터 소자에서 발생하는 손실을 계산하였다.

본 논문에서는 3가지 제어기법으로 BLDC Motor를 구동하였다. 첫 번째로 통전되는 2개의 상들에 게이팅 펄스가 인가되는 바이폴라 PWM기법과 두 번째는 각 스위치의 게이팅 신호를 얻는 유니폴라 PWM기법을 사용하였으며, 마지막으로 유니폴라 PWM 기법의 일종인 2개의 상들 중에서 1개의 상에만 게이팅 펄스가 인가되는 방식으로 구동하였다. 두 번째와 세 번째 명칭을 구분하기 위해서 본 논문에서는 전자를 유니폴라 I 후자를 유니폴라 II라고 가정하였다[4,5]

2장에서는 BLDC Motor에서의 IGBT와 Inverse diode 손실 계산의 기본원리에 대해서 설명하고, 3장에서는 바이폴라, 유니폴라 I, 유니폴라 II 방식에 대해 설명할 것이며, 본 논문의 중점이 되는 BLDC의 IGBT와 Inverse diode 소자에 대한 손실 계산식을 가지고 스위칭에 따른 전력손실을 구한다. 4장에서는 BLDC Motor에 3개의 전류 제어기법을 사용하여 시뮬레이션을 통한 스위칭 소자의 전력손실 차이점을 확인하고, 5장 결론에서는 나아가 방향을 제시한다

2. 인버터의 전력 손실 계산 방법

2.1 인버터의 구성

인버터의 구성은 그림 1에서 보듯이 IGBT와 Inver diode가 한 쌍으로 결합되어 6개의 소자로 이루어진 구동회로이다.

2.2 IGBT와 Inverse diode 전력손실[6]

IGBT와 Inverse diode의 총 전력손실은 정적 특성인 도통손실과 동적 특성인 스위칭 손실로 나누어진다. Inverse diode는 스위칭 전력손실이 작기 때문에 switching 손실은 무시하였다. 반면,

IGBT에서는 PWM제어에 의해 스위칭이 on/off를 반복하여 스위칭 손실이 중합손실을 좌우하게 된다.

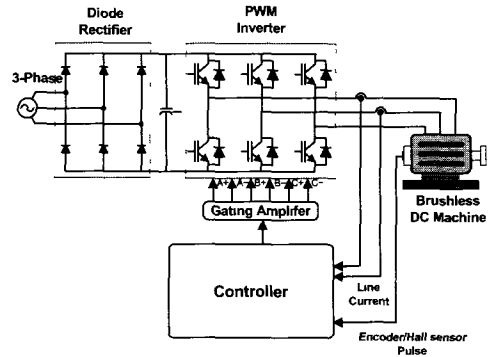


그림 1 BLDC Motor 시스템

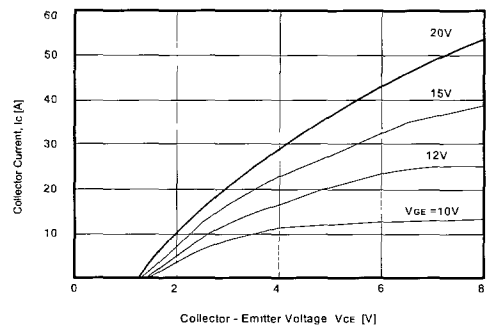


그림 2 IGBT dc의 전기적 특성

반도체 소자에서의 도통손실은 소자의 on-voltage 특성인 piecewise linear approximation을 사용하여 간략화 될 수 있다. 그림 2에서 보듯이 높은 전류 영역 (I_C)에서 기울기에 따라 증가하는 on-resistance를 구할 수 있으며, 전압 (V_{CE})축으로 piece-wise linear on-voltage를 얻을 수 있다.

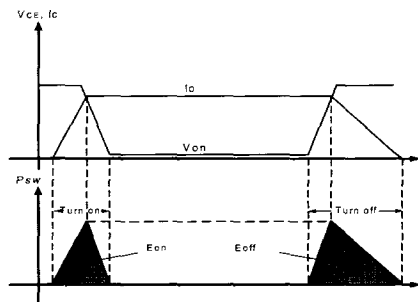


그림 3 이상적인 스위칭 손실

그림 3에서는 switching시의 전압, 전류 파형을 나타내었다. 이 파형에서 turn on시와 turn off시의 과도 영역에 대해서 전압 전류의 곱을 시간으로 적분하여 스위칭 손실 E_{on} , E_{off} 을 얻을 수 있다. E_{on} , E_{off} 의 합은 다시 E_{tot} 로 나타낼 수 있다.

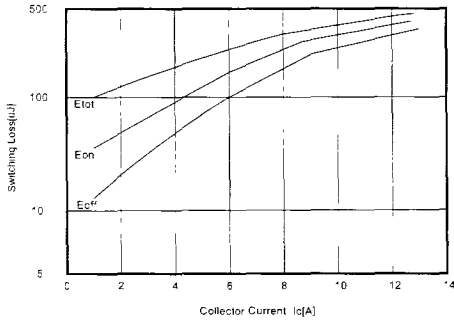


그림 4 스위칭 손실 vs Collector Current

그림 4에서 보듯이 스위칭 에너지 손실은 전류의 함수이다. 정격 6.5A 600V IGBT에 대한 turn-on, turn-off 손실을 나타내고 있으며, 두 손실을 합한 총 에너지 손실도 나타내고 있다.

2.3 BLDC Motor의 구동에 따른 Inverter의 손실 계산

본 논문에서 구동된 BLDC Motor는 역기전력이 사다리꼴 형태이고 토크 리플을 감소시키기 위해 요구되는 상전류는 펄스 폭이 120°의 준 구형파이다[7].

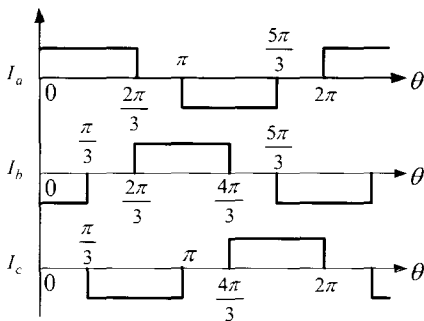


그림 5 BLDC Motor의 이상적인 전류 파형

그림 5는 이상적인 상전류 준 구형파를 나타내고 있다. 준 구형파 모양으로 원하는 크기와 주기를 만들어 주기 위해서는 PWM을 통해 스위칭이 결정되고, IGBT와 Inverse diode 전류는 modula-

tion technique에 많이 의존된다[6].

스위칭 on/off 구간에 따라 IGBT와 Inverse diode 전류 파형의 크기가 달라지고, 이것은 스위치 한 주기에서 on되는 시간인 duty cycle을 안다면 도통 손실을 구할 수 있다.

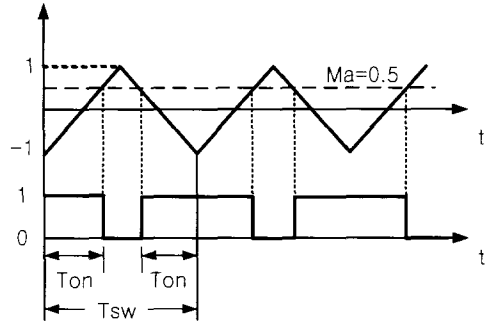


그림 6 PWM control

그림 6을 통하여 duty cycle식을 구할 수 있다. 여기서 reference 전압이 DC이므로 한 상의 IGBT duty cycle은 (1)식으로 나타낼 수 있고, Inverse diode의 duty cycle은 IGBT duty cycle의 반대로 커지므로 (2)식과 같이 나타낼 수 있다. M_a 는 크기 변조 비로 범위는 0~1이고, 정의는 $M_a = V_{control} / V_{in}$ 이다.

$$d_{IGBT} = \frac{1}{2}(1 + M_a) \quad (1)$$

$$d_{DIODE} = \frac{1}{2}(1 - M_a) \quad (2)$$

IGBT와 diode에 대한 도통손실은 on-voltage 특성인 piecewise linear approximation을 이용하여 구할 수 있고, IGBT와 diode의 등가회로는 on-resistance와 on-voltage로 나타낼 수 있다. on-voltage를 포함한 등가회로에서의 전력손실은 평균전류와 on-voltage 곱으로 나타낼 수 있으며 on-resistance에서 전력손실은 실효 전류 제곱과 on-resistance 곱으로 표현할 수 있다[6]. 이것을 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$P_{IGBT(cond)} = (\bar{I}_{IGBT} \cdot V_{IGBT}) + (|I_{IGBT}|_{RMS}^2 \cdot R_{IGBT}) \quad (3)$$

$$P_{DIODE(cond)} = (\bar{I}_{DIODE} \cdot V_{DIODE}) + (|I_{DIODE}|_{RMS}^2 \cdot R_{DIODE}) \quad (4)$$

IGBT소자와 Inverse diode의 평균전류와 실효 전류 구하는 식은 다음과 같다.

$$\bar{I}_{IGBT} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\frac{2\pi}{3}} \bar{I} \cdot d_{IGBT} \cdot d\theta \quad (5)$$

$$\bar{I}_{DIODE} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\frac{2\pi}{3}} \bar{I} \cdot d_{DIODE} \cdot d\theta \quad (6)$$

$$|I_{IGBT}|_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{\frac{2\pi}{3}} \bar{I}^2 d_{IGBT} d\theta} \quad (7)$$

$$|I_{DIODE}|_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{\frac{2\pi}{3}} \bar{I}^2 d_{DIODE} d\theta} \quad (8)$$

여기서 \bar{I} 는 BLDC Motor 상전류 평균값이다
IGBT 소자의 스위칭 손실은 그림 3에서 보는바
와 같이 스위칭 총 에너지 (E_{tot})을 tm위칭 시간의
주기로 나누면 총 스위칭 손실이 된다. 즉 한 개의
IGBT 소자의 스위칭 구간은 2π 한 주기에서 $2\pi/3$
만 스위칭 하므로 스위칭 손실을 수식으로 나타내
면 다음식과 같다.

$$P_{SW} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\frac{2\pi}{3}} f_{sw} \cdot E_{tot} \cdot d\theta = \frac{f_{sw} E_{tot}}{3} \quad (9)$$

여기서 f_{sw} 는 스위칭 주파수를 나타낸다.

한 개의 IGBT와 Inverse diode의 총 손실은 식
(10)으로 나타낼 수 있고, 인버터 구동 회로에 사
용된 6개의 IGBT와 Inverse diode의 총 손실은 식
(11)식에 나타나 있다.

$$P_{Aswitchloss} = (P_{IGBT} + P_{DIODE} + P_{SW}) \quad (10)$$

$$P_{Totalloss} = (P_{IGBT} + P_{DIODE} + P_{SW}) \times 6 \quad (11)$$

3. 바이폴라, 유니폴라 I, 유니폴라 II의 동작 방식

3.1 바이폴라 동작 방식

바이폴라 스위칭 방식의 전압 스위칭에서는 스
위치가 두 개의 쌍으로 취급되어 두 스위치 쌍 중
하나는 항상 온 상태가 된다. 스위칭 신호는 스위
칭 주파수의 삼각파와 V_{in} 와 제어 전압 $V_{control}$ 을

비교함으로써 발생된다. $V_{control}$ 이 V_{in} 보다 크면
IGBT 스위치가 on되고 $V_{control}$ 이 V_{in} 보다 작으면
IGBT 스위치는 off되고 전류는 Inverse diode를
통해 흐른다.

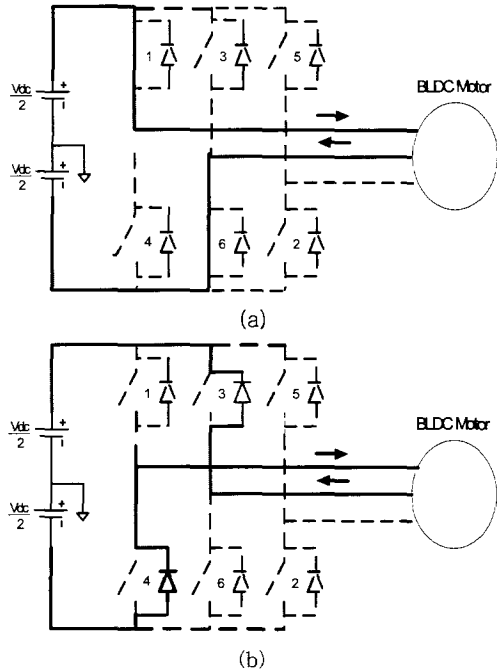


그림 7 BLDC Motor drive의 등가회로

BLDC는 3상 2역자 방식으로 0~60도 구간에서
스위치 1, 6이 동작한다면 Inverter gates에 신호가
들어가면 그림 7(a)처럼 전류가 흐르고, 게이팅 신
호가 없으면 그림 7(b)처럼 전류가 흐른다

3.2 유니폴라 I 동작 방식

유니폴라 I는 두 개의 제어전압 $V_{control}$ 와
 $-V_{control}$ 을 삼각파와 비교하여 두 개의 스위칭 신
호를 만들어 준다. 바이폴라 방식과 동일하게
 $V_{control}$ 이 V_{in} 보다 크면 IGBT 스위치가 on되고
 $V_{control}$ 이 V_{in} 보다 작으면 IGBT 스위치는 off된
다. 이와 같은 스위치 동작에 의해 얻어지는 출력
파형은 그림 8에 나타나 있다. 1번 파형과 비교하
여 2, 3번의 극(pole) 전압 파형을 얻었으며, 두 극
전압의 차이로 4번과 같은 선간 전압 파형을 구할
수 있다.

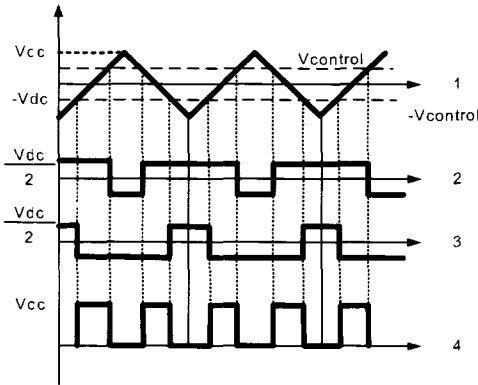


그림 8 유니폴라 I 방식에 의한 출력전압

3.3 유니폴라 II 동작 방식

유니폴라 II는 통전되는 2개의 상들 중에서 1개의 상에만 PWM 펄스가 인가되는 방식이다. 이 방식은 전기적으로 120도의 통전 구간 중 선단부의 60도 구간에만 PWM 펄스가 인가되는 선단부 유니폴라 PWM 방식으로 스위칭에 의한 전기적인 스트레스를 6개의 스위칭 소자에 골고루 분담시키는 특징이 있다[5]. 그림 9는 유니폴라 II 방식의 게이트 펄스 파형을 보여주고 있다

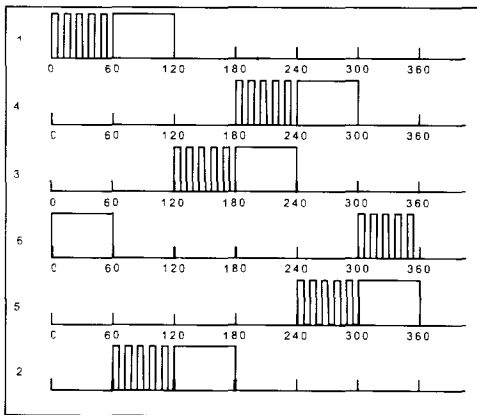


그림 9 유니폴라 II 방식에 의한 스위치 펄스 파형

3.4 3가지 스위칭 방식 손실 계산

3가지 스위칭 방식이 다르기 때문에 계산식이 달리 적용된다. 2.3절에서 설명한 계산식에서 평균전류와 실효전류, 스위칭 손실 계산식은 바이폴라, 유니폴라 I 에서 동일하게 사용되며 (12)~(14)식은 유니폴라 II에서 사용된다.

$$I_{IGBT} = \frac{1}{2\pi} \left[\left(\int_0^{\frac{\pi}{3}} \bar{I} \cdot d_{IGBT1} \cdot d\theta \right) + \left(\int_{\frac{2\pi}{3}}^{\pi} \bar{I} \cdot d_{IGBT2} \cdot d\theta \right) \right] \quad (12)$$

$$I_{DIODE} = \frac{1}{2\pi} \left[\left(\int_0^{\frac{\pi}{3}} \bar{I} \cdot d_{DIODE1} \cdot d\theta \right) + \left(\int_{\frac{2\pi}{3}}^{\pi} \bar{I} \cdot d_{DIODE2} \cdot d\theta \right) \right]$$

$$* d_{IGBT1} = \frac{1}{2} (1 + M_a), d_{IGBT2} = 1$$

$$d_{DIODE1} = \frac{1}{2} (1 - M_a), d_{DIODE2} = 0$$

(12)식은 평균전류를 구하는데 사용된다.

$$|I_{IGBT}|_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} A}$$

$$A = \left(\int_0^{\frac{\pi}{3}} \bar{I}^2 d_{IGBT1} d\theta + \int_{\frac{2\pi}{3}}^{\pi} \bar{I}^2 d_{IGBT2} d\theta \right) \quad (13)$$

$$|I_{DIODE}|_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} B}$$

$$B = \left(\int_0^{\frac{\pi}{3}} \bar{I}^2 d_{DIODE1} d\theta + \int_{\frac{2\pi}{3}}^{\pi} \bar{I}^2 d_{DIODE2} d\theta \right)$$

(13)식은 실효전류를 구하는데 사용된다.

$$P_{SW} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{3}} f_{sw} \cdot E_{tot} \cdot d\theta = \frac{f_{sw} E_{tot}}{6} \quad (14)$$

(14)식은 스위칭 손실 계산에 사용된다.

4. 시뮬레이션

4.1 시뮬레이션 조건 설정

본 논문에서는 스위칭 방식에 따라 손실의 변화량을 고찰하기 위하여 전력전자 분야에서 널리 사용되고 있는 Math works의 Matlab 6.1 프로그램을 사용하였다.

인버터 직류단 전압은 300[V], 스위칭 주파수는

바이폴라 스위칭 주파수를 기준으로 10[kHz], 5[kHz]로 동작시켜 그에 따른 토크리플 폭을 맞췄다. 그 이유는 같은 토크리플 상에서 IGBT와 Inverse diode의 전력손실을 비교하기 위함이다. 이에 따라 유니폴라 I과 유니폴라 II의 스위칭 주파수는 가변적이다. PI전류 제어기의 주파수 대역폭과 이득은 충분히 크게 설정하여 이상적인 전류 제어를 하도록 하였다. 역기전력은 속도 지령을 적분하여 각속도를 얻어 이상적으로 만들었다. 본 논문의 시뮬레이션을 위한 BLDC Motor의 파라미터는 표1과 같다

표 1 BLDC Motor의 파라미터

정격출력	W	550 [W]
정격전압	V	170 [V]
정격전류	A	3.2 [A]
관성	J	0.001323 [kg · m ²]
극수	P	4
저항	R	2.47 [Ω]
인덕턴스	L	21.8 [mH]
토크상수	Kt	0.573 [Nm]
역기전력상수	Ke	0.0338 [V/rpm]

4.2 시뮬레이션 결과

(1) 바이폴라 시뮬레이션 결과

그림 10의 파형 조건은 상전류 3A, 스위칭 주파수 10kHz, 속도 1000rpm, Ma는 0.17일 때 나온 전류 파형이다. 그림 11은 인버터의 도통손실과 스위칭 손실을 합한 총 손실을 나타낸 것이다.

(2) 유니폴라 I 시뮬레이션 결과

그림 12과 그림 13의 파형 조건은 상전류 3A, 스위칭 주파수 2.5kHz 속도 1000rpm, Ma는 0.17이다.

(3) 유니폴라 II 시뮬레이션 결과

그림 14과 그림 15의 파형 조건은 상전류 3A, 스위칭 주파수 46kHz, 속도 1000rpm, Ma는 0.17이다. 시뮬레이션 조건에서 3가지 스위칭 방식은 스위칭 주파수 제외한 나머지 조건은 동일하다 이는 동일한 전류 리플 상태에서 총 손실을 비교하기 위함이다.

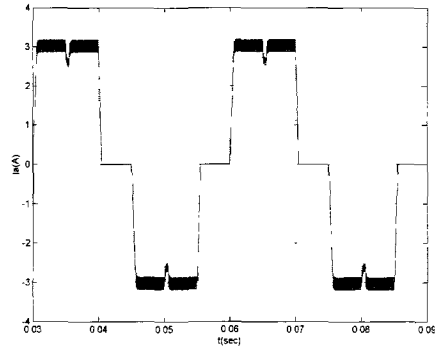


그림 10 바이폴라 스위칭 방식의 전류 파형

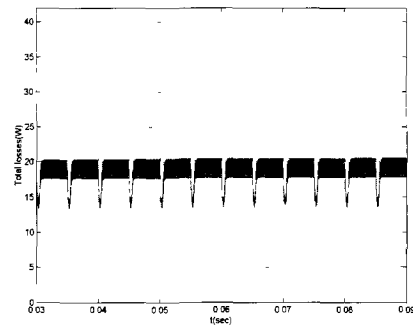


그림 11 바이폴라 스위칭 방식의 총 손실

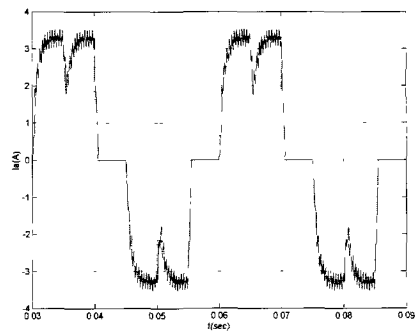


그림 12 유니폴라 I 스위칭 방식의 전류 파형

(4) 3가지 스위칭 방식 손실 비교

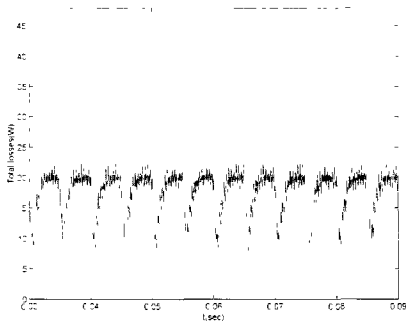


그림 13 유니폴라 I 스위칭 방식의 총 손실

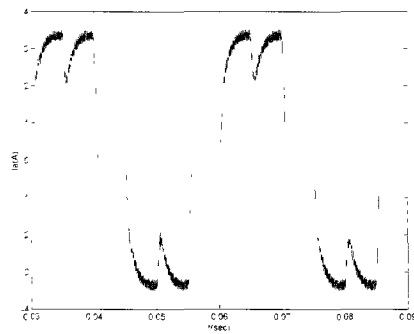


그림 14 유니폴라 II 스위칭 방식의 전류 파형

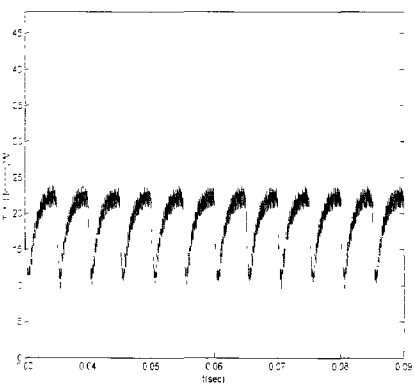


그림 15 유니폴라 II 스위칭 방식의 총 손실

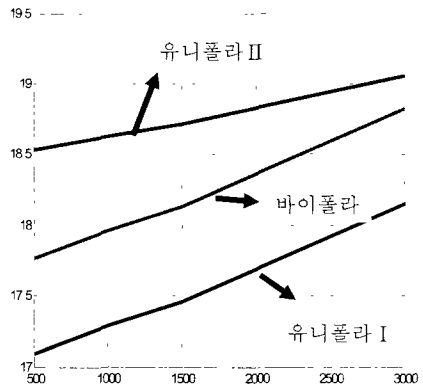


그림 16 전력손실 vs 전동기 속도
(전류리플 : 0.646A, 상전류 : 3A)

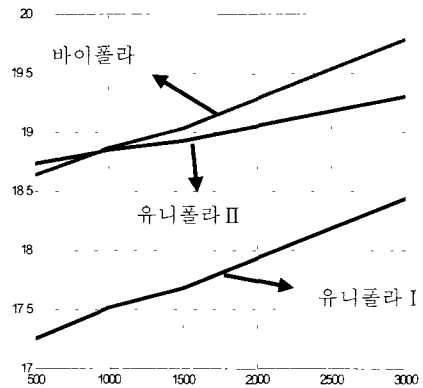


그림 17 전력손실 vs 전동기 속도
(전류리플 : 0.316A, 상전류 : 3A)

그림 16과 그림 17에서 전류리플을 달리한 상태에서 전동기 속도가 증가함에 따라 인버터의 총 손실을 나타낸 그림이다. 그림 16에서는 유니폴라 II가 가장 큰 손실을 나타냈고, 그림 17에서는 바이폴라 방식이 더 큰 손실을 나타내었다 이 두 그림에서 알 수 있듯이 유니폴라 I이 가장 적은 인버터 총 손실을 나타내고 있다.

5. 결론

인버터와 같은 시스템을 모터에 사용하는데 있어 신뢰성은 중요시 되며, 특히 소자의 발열 부분이 큰 비중을 차지한다 일반적으로 소자의 직접

접합부에 온도 센서를 부착하지 않고, 전력손실을 판단하는 것은 어려운 실정이다. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 논문에서는 BLDC Motor에서 인버터의 소자인 IGBT와 Inverse diode의 스위칭 방식에 따라 전력 손실을 구할 수 있는 모델링을 구현하였다. 구현한 과정에서 전력손실을 계산하는데 여러 가지 변수들이 영향을 줄 수 있지만, 특히 스위칭 방식에 따른 duty cycle이 전력 손실계산에 큰 영향을 미치게 된다. 본 논문에서는 이러한 관계를 이용하여 구현한 모델링을 통해 전력전자소에서 발생하는 손실 데이터를 얻을 수 있었으며, 얻어진 데이터로서 소자에 부착되는 방열판 설계에 큰 도움이 될 수 있을 것이라 사료된다.

pp.414, 1997

참 고 문 헌

- [1] Muhammand H. Rashid, "Power Electronics", *ACAEDMIC PRESS*, pp.102, 2001.
- [2] Pragason Pillay and Ramu Krishnan, "Application Characteristics of Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC Motor for Servo Drives", *IEEE Trans, on Ind. App.*, Vol. 27, No. 5, pp.986-996, Sep/Oct. 1991.
- [3] Paresh C. Sen, "Principles of Electric Machines and Power Electronics.", *SciTech media*, pp.360, 1998.
- [4] Mohan, Undeland, Rpbbins, "Power Electronics (-conv erters, Applications, and Design-)", *WILEY*, pp219-223, 1997.
- [5] 이광운, 박정배, 여형기, 유지윤, "A study on Reduction of Current Ripple due to Commutation in Brushless DC motor", *KIEE*. vol48B. NOp, pp.490-491, Sep.1999
- [6] Ken Berringer, J. Marvin and P. Perruchoud, "Semiconductor Power Losses in AC inverters", *Conf. Rec of IEEE IAS' 95*, pp.882-888, 1995
- [7] 김상훈, 김진용, "BLDC 전동기를 위한 고성능 전류 제어기법", *강원대학교 산업기술 연구소 산업기술 연구논문집*, 제 22권 B호, pp.125-132, 2002.12
- [8] Dejan Srajber, Werner Lukasch, "The Calculation of the Power Dissipation for the IGBT and the Inverse Diode in Circuits with the sinusoidal output Voltage", *SEMIKRON INTERNATIONAL* Dr.Fritz Martin GmbH & Co. KG Sigmundstraße 200 W-8500 Nrnberg 82, pp 9.
- [9] Marvin J. Fisher. "Power Electronics", *ITP*,