

BLDC 전동기의 개선된 Unipolar PWM 방법

全龍鎬[†], 趙 滉^{*}, 崔 翼^{**}

An Improved Unipolar PWM Method for bldc motors

Young-Ho Jeon, Whang Cho and Ick Choy

요 약

본 논문에서는 BLDC MOTOR를 2상 여자 unipolar PWM방식으로 구동할 때 개방된 상의 역병렬 다이오드를 통해 원치 않는 누설전류의 흐름이 생기는 원인 및 영향을 분석하고 이를 제거할 수 있는 개선된 unipolar PWM 방식을 제안하였다. 개방된 상에 흐르는 누설전류는 속도가 증가할수록, PWM duty가 감소할수록 증가하며 전동기 출력의 손실을 초래한다. 제안된 unipolar PWM방식의 유효성을 시뮬레이션 및 실험을 통하여 검증하였다.

ABSTRACT

In the 2-phase excited BLDC motor drives using a unipolar PWM scheme, there exists, in some cases, an unwanted leakage current which flows through the anti-parallel diode in the non-excited phase leg of the inverter. In this paper the cases in which the leakage current exists and the influence of the leakage current are analyzed, and a novel unipolar PWM scheme which can eliminate the leakage current is proposed. The leakage current increases as the motor speed is increased or PWM duty is decreased, and as a result the output power of the motor is reduced considerably. The effectiveness of the proposed unipolar PWM scheme is verified through the comparative simulations and experiments.

Key Words : A unwanted leakage current, Anti-parallel diode, A novel unipolar PWM scheme

1. 서 론

3상 Y결선된 BLDC 전동기는 그림 1에 보인 바와 같이 사다리꼴의 역기전력파형을 가지며 일정한 토크 출력을 얻기 위해선 그림 1에 보인 이상적인 상전류를 흘려주어야 한다^{[1][2][3]}.

이와 같은 각 상전류를 흘리기 위해선 영구자석 회전자의 위치에 따라 항상 두상의 전류만 흐르게 인버터

의 스위치를 PWM 구동하고, 나머지 한상은 개방된 상태를 유지하는 2상 여자방식을 사용한다. 그림 1은 정방향 토크를 발생시키는 경우이며 역방향 토크를 발생시키는 경우는 각상의 전류 방향을 바꾸어주면 된다.

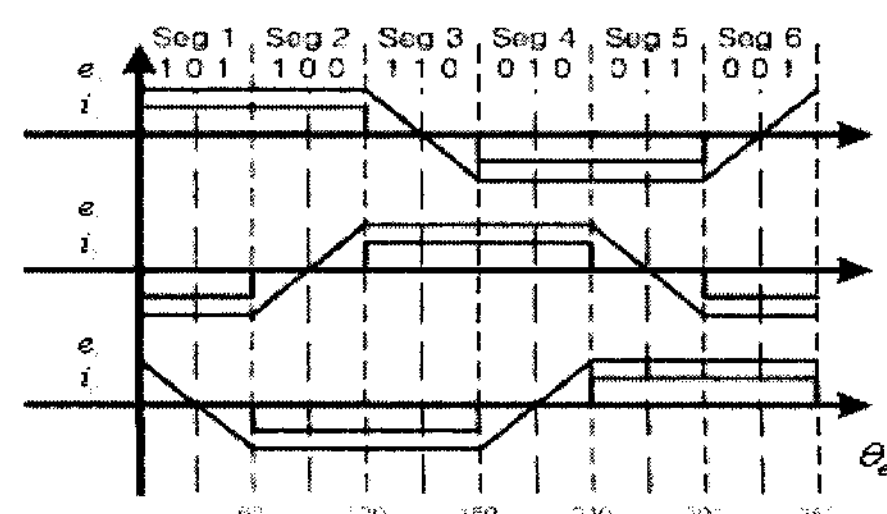


그림 1 역기전력파형과 상전류

Fig. 1 Back EMF waveform and phase current

[†]교신저자 : 학생회원, 광운대 정보제어공학과 박사과정
E-mail : waterjliar@gmail.com

^{*}정회원, 광운대 정보제어공학과 교수

^{**}정회원, 광운대 정보제어공학과 교수

접수일자 : 2008. 2. 12 1차 심사 : 2008. 3. 12

2차 심사 : 2008. 4. 2 심사완료 : 2008. 4. 3

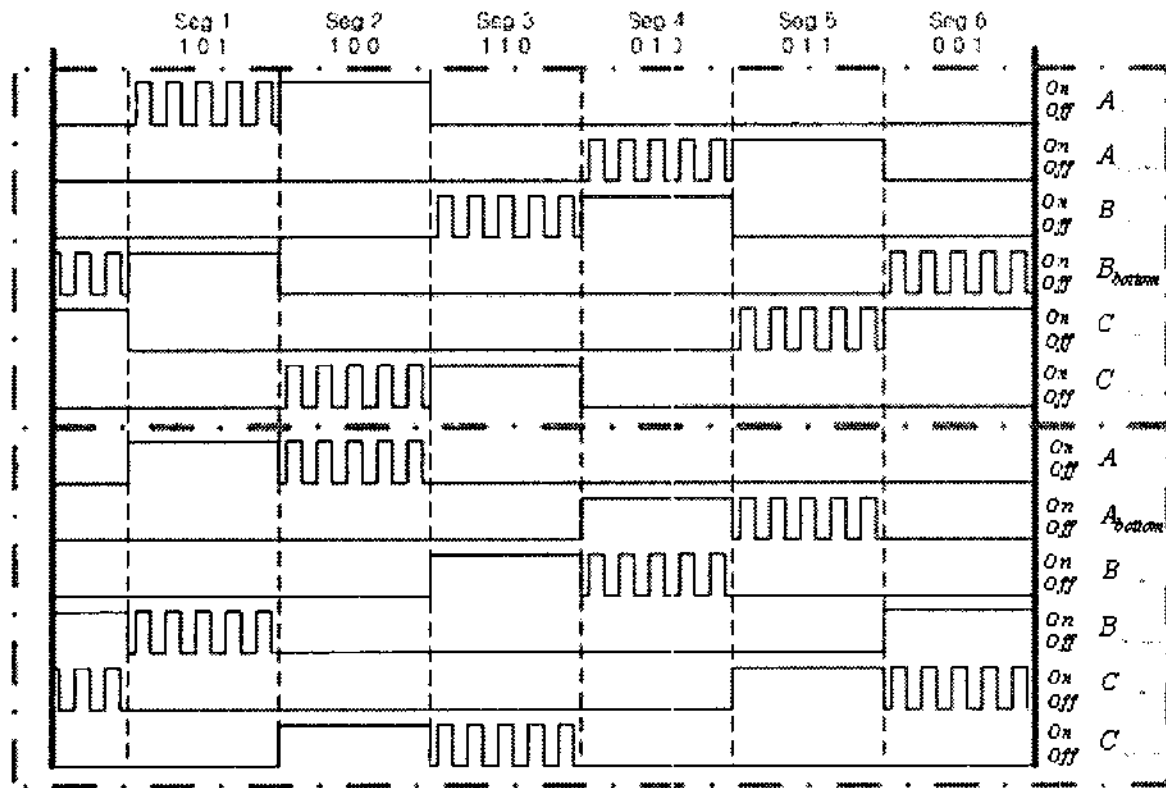


그림 2 조합된 unipolar PWM 구동방식^[2]
Fig. 2 Mixed Unipolar PWM driving

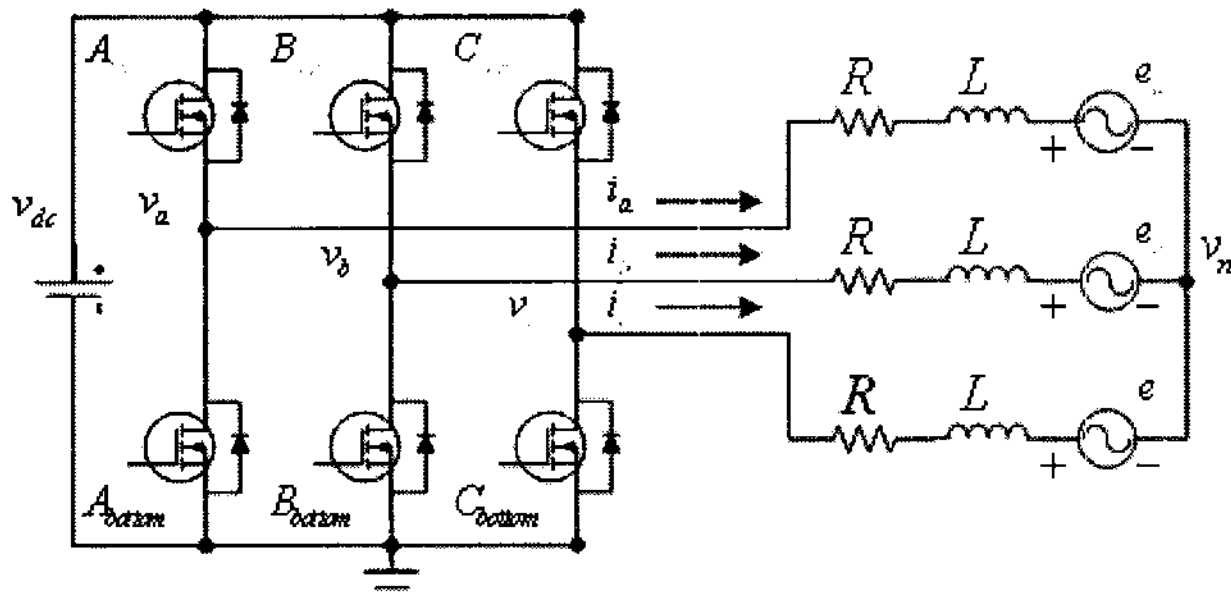


그림 3 BLDC 전동기 구동 시스템
Fig. 3 BLDC motor driving system

인버터의 PWM 구동방식은 전류가 흐를 두상 중 한 스위치만 PWM구동하고, 다른 스위치는 항상 켜놓는 Unipolar PWM 방식과 두상의 스위치를 모두 PWM 구동 하는 Bipolar PWM 방식으로 나눌 수 있다^{[1][2][3]}.

Unipolar PWM 방식은 PWM구동하는 스위치의 선택에 따라 상단스위치 구동방식과 하단스위치 구동방식으로 나눌 수 있다. 이 경우 PWM 구동하는 스위치의 부담이 늘어나기 때문에 PWM 구동 스위치의 부담을 줄이고자 그림 2에 보인바와 같이 구간에 따라 상단스위치 구동방식과 하단스위치 구동방식을 적절히 조합하여 사용하는 것이 일반적이다^{[1][2][3]}.

이러한 Unipolar PWM 방식에서는 구간별 PWM 방식의 조합에 따라 개방된 상에 원치 않는 누설 전류가 흐를 수 있다. 예를 들면 그림 1의 Seg1 구간의 일부에서 c상에 인버터의 역병렬 다이오드를 통하여 누설 전류가 흐르게 되는 경우가 있다. 본 논문에서는 이러한 누설 전류가 흐르게 되는 원인과 그 영향을 규명하고 누설전류를 제거할 수 있는 개선된 unipolar PWM 방식을 제안하고자 한다.

2. 누설전류의 원인 및 영향

그림 3은 일반적인 BLDC 전동기 구동시스템을 보인 것이다. 스위칭 소자와 이와 역병렬로 연결된 다이오드로 구성된 6개의 스위치로 이루어진 인버터는 직류 입력전원을 PWM 제어하여 BLDC 전동기를 구동한다. 이하 인버터 회로에서 각 스위치의 전압 강하는 작은 양으로 가정하고 무시한다.

그림 3에서 BLDC 전동기의 전압관계식은 식(1)^{[1][3]}과 같이 된다.

$$\begin{bmatrix} V_a - V_n \\ V_b - V_n \\ V_c - V_n \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + L \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서 R, L 은 각 상의 저항, 누설 인덕턴스이고 v_a, v_b, v_c 는 각 상의 단자전압으로 DC 전압원의 기준에서 본 것이며 e_a, e_b, e_c 및 i_a, i_b, i_c 는 각 상의 역기전력 및 상전류이다. v_n 은 DC 전압원의 기준에서 본 전동기 내부의 중성점 전압으로서 각 상의 저항과 누설 인덕턴스가 동일하다면, 전동기의 중성점을 사용하지 않는 경우 각 상전류의 합이 항상 0 임으로 식(2)와 같이 표현된다.

$$v_n = \frac{\sum_i v_i - \sum_i e_i}{3}, i = a, b, c \quad (2)$$

이상적인 역기전력의 파형은 그림 1과 같고, 식(3)과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} e_a &= k_e \omega_m f_a(\theta_e) \\ e_b &= k_e \omega_m f_b(\theta_e) \\ e_c &= k_e \omega_m f_c(\theta_e) \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 k_e 는 역기전력 상수이고, ω_n 은 영구자석 회전자의 각속도이다. $f(\theta_e)$ 는 각 상의 역기전력을 회전자의 위치(θ)에 따라 정규화한 함수이다.

본 절에서는 Unipolar PWM 방식과 Bipolar PWM 방식에 있어 개방된 상에 원치 않는 누설전류가 흐를 수 있는 경우에 대하여 설명하고 그 영향을 알아보고자 한다.

2.1 Unipolar PWM 방식

2.1.1 상단스위치 구동방식

그림 4는 상단스위치 구동방식을 보인 것이다.

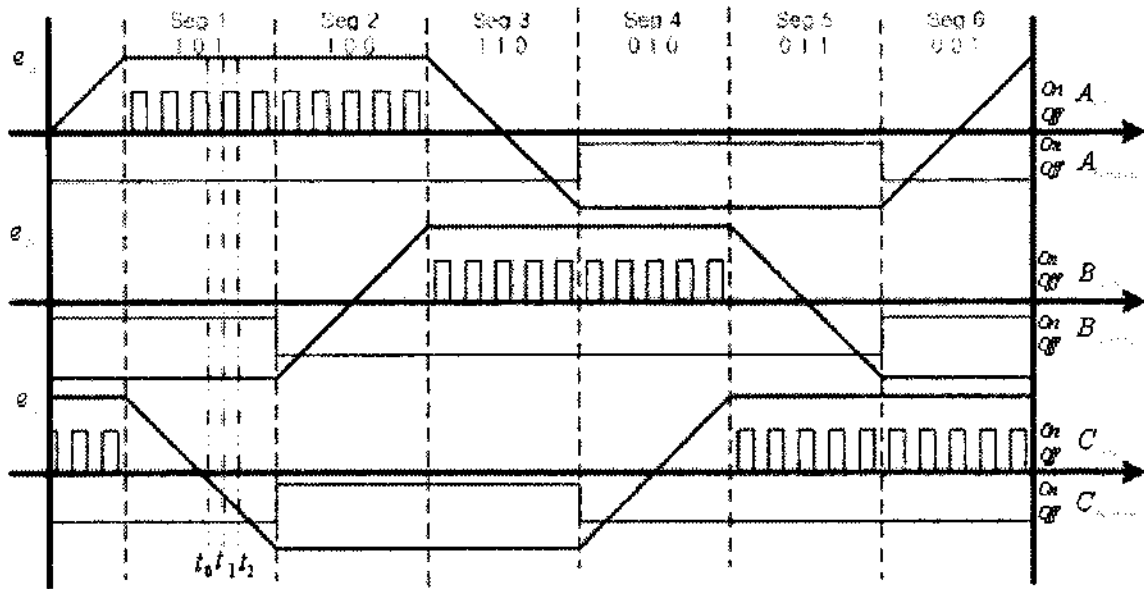


그림 4 상단스위치 구동방식
Fig. 4 Top switch driving

a상에서 b상으로 전류가 흐르는 seg1 구간을 예를 들어 보면, b상 하단스위치(B_{bottom})는 항상 on 되고, a상 상단스위치(A_{top})가 PWM 구동된다. a상 상단스위치가 on 되면 $v_a = v_{dc}$, $v_b = 0$, $v_c = e_c + v_n$, $e_a = -e_b$ 이므로 식(2)로부터 $v_n = v_{dc}/2$ 가 되고, 따라서 c상 상/하단스위치의 역병렬 다이오드는 off 되어 c상 전류는 0으로 유지된다. a상 상단스위치가 off 되면 a/b상 전류가 연속인 경우 a상 하단 역병렬 다이오드가 on 되므로 $v_a = 0$, $v_b = 0$, $v_c = e_c + v_n$, $e_a = -e_b$ 이고 식(2)로부터 $v_n = 0$ 이 된다. 이 경우 $e_c > 0$ 이면 c상 스위치의 상/하단 역병렬 다이오드가 모두 off 되어 인버터의 전류는 그림 5의 (a)→(c)→(a)→(c)의 순서로 흐른다. 그러나 $e_c < 0$ 인 경우는 c상 스위치의 하단 역병렬 다이오드가 on 되어 c상에 누설전류가 흐르기 시작한다. 이 때 $v_a = 0$, $v_b = 0$, $v_c = 0$, $e_a = -e_b$ 이고 식(2)로부터 $v_n = -e_c/3$ 이 되어 c상 누설전류가 계속 흐르게 된다. 이 경우 누설전류를 정량적으로 분석해 보면 다음과 같다.

$e_c < 0$ 인 구간에서 처음으로 상단스위치가 off 되는 시간을 t_0 라고 하면 c상 하단스위치의 역병렬 다이오드로 흐르는 누설전류는 식(4)와 같다.

$$i_c(t) = -\frac{1}{R} \frac{2e_c}{3} (1 - e^{-\frac{R}{L}(t-t_0)}), \quad t \geq t_0 \quad (4)$$

이후 $t = t_1$ ($t_1 > t_0$)에서 a상 상단스위치가 다시 on 되면 $v_a = v_{dc}$, $v_b = 0$, $v_c = 0$, $e_a = -e_b$ 이 되고 식(2)로부터 $v_n = (v_{dc} - e_c)/3$ 가 되며, c상 하단스위치의 역병렬 다이오드로 흐르는 누설전류는 식(5)와 같이 감

소하게 된다.

$$i_c(t) = -\frac{1}{R} \frac{2e_c}{3} (1 - e^{-\frac{R}{L}(t-t_0)}) e^{-\frac{R}{L}(t-t_1)} - \frac{1}{R} \frac{v_{dc} + 2e_c}{3} (1 - e^{-\frac{R}{L}(t-t_1)}), \quad t \geq t_1 \quad (5)$$

이 누설전류가 0이 되는 시간 t_{off} 는 식(6)과 같으며 이 때 $v_n = v_{dc}/2$ 이 되어 누설전류는 더 이상 흐를 수 없게 된다.

$$t_{off} = t_1 - \frac{L}{R} \ln \left(\frac{v_{dc} + 2 \cdot e_c}{v_{dc} + 2e_c \cdot e^{-\frac{R}{L}(t_1-t_0)}} \right) \quad (6)$$

이후 새로운 PWM주기에서는 이상 설명한 대로 반복하여 그림 5의 (a)→(b)→(d)→(a)→(b)→(d)의 순서로 누설 전류가 흐르게 된다.

만약 t_{off} 이전에 새로운 PWM 주기가 시작되어 a상 상단스위치가 다시 off 되면 c상 누설전류는 식(7)과 같이 $i_c(t_2)$ 를 초기값으로 하여 다시 증가하게 된다.

$$i_c(t) = i_c(t_2) e^{-\frac{R}{L}(t-t_2)} - \frac{1}{R} \left(\frac{2e_c}{3} \right) (1 - e^{-\frac{R}{L}(t-t_2)}), \quad t \geq t_2 \quad (7)$$

이 경우 c상 누설전류는 연속이 되며 그림 5의 (a)→(b)→(d)→(b)→(d)순서로 누설전류가 흐르게 된다.

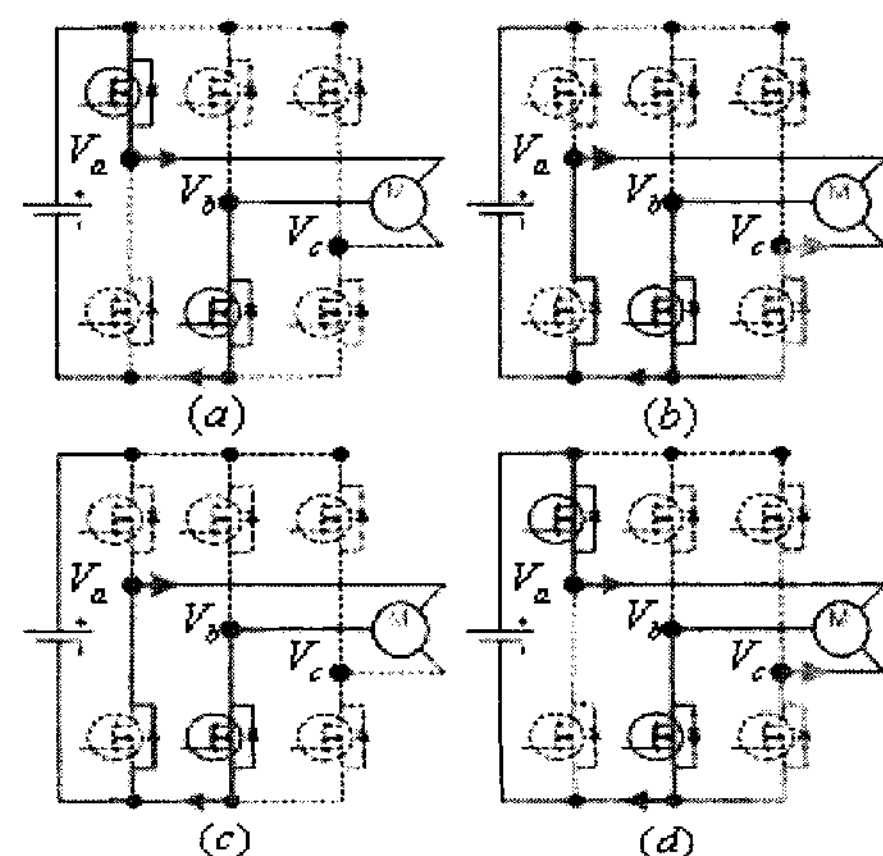


그림 5 인버터회로의 전류흐름
Fig. 5 Current flow of the inverter circuit

이상 설명한 바와 같이 상단스위치 구동방식에서는 개방된 상의 역기전력이 음수일 때 해당 상에 누설전류가 흐르게 됨을 알 수 있다. 즉, 그림 4의 seg3과 seg6에서는 $e_c < 0$ 인 구간에서, seg2와 seg5에서는 $e_b < 0$ 인 구간에서, seg1과 seg4에서는 $e_a < 0$ 인 구간에서 해당 개방상의 하단 역병렬 다이오드를 통하여 누설전류가 흐른다.

2.1.2 하단스위치 구동방식

그림 6은 하단스위치 구동방식을 보인 것이다.

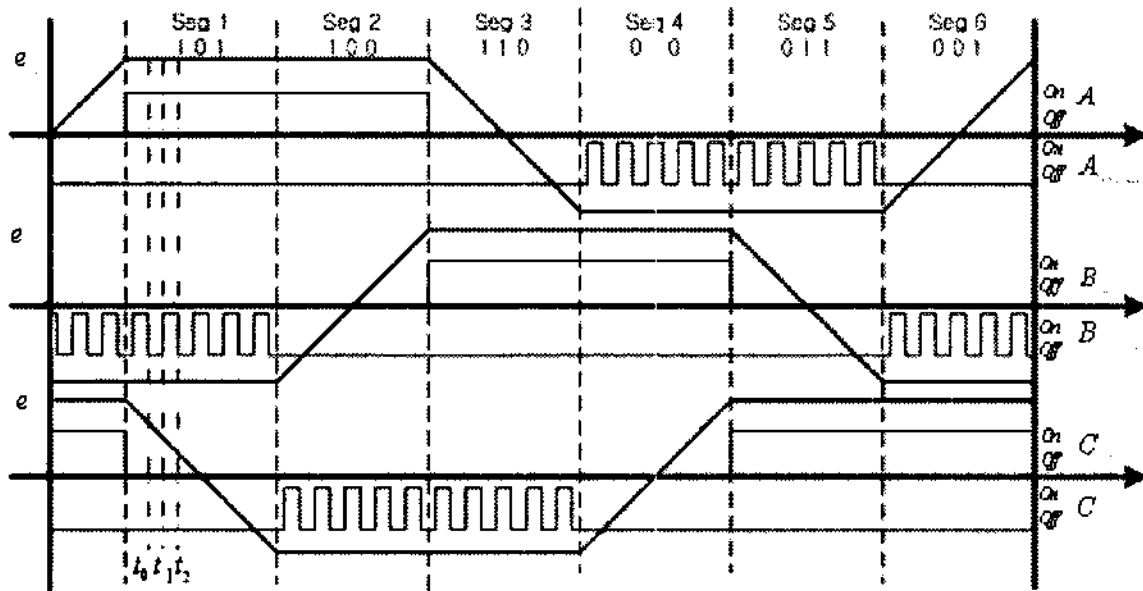


그림 6 bottom 스위치 구동방식
Fig. 6 Bottom switch driving

a상에서 b상으로 전류가 흐르는 seg1 구간을 예로 들면 a상 상단스위치(A_{top})는 항상 on 되고, b상 하단스위치(B_{bottom})가 PWM 구동된다. b상 하단스위치가 on 되면, $v_a = v_{dc}$, $v_b = 0$, $v_c = e_c + v_n$, $e_a = -e_b$ 이므로 식(2)로부터 $v_n = v_{dc}/2$ 가 되고, 따라서 c상 상/하단 스위치의 역병렬 다이오드는 off 되어 c상 전류는 0으로 유지된다. 이후 b상 하단스위치가 off 되면 a/b상 전류가 연속인 경우 b상 상단 역병렬 다이오드가 on 되므로, $v_a = v_{dc}$, $v_b = v_{dc}$, $v_c = e_c + v_n$, $e_a = -e_b$ 이고 식(2)로부터 $v_n = v_{dc}$ 가 된다. 이때 $e_c < 0$ 인 경우 c상 스위치의 상/하단 역병렬 다이오드가 모두 off 된다. 이 경우 인버터의 전류는 그림 7의 (a)→(c)→(a)→(c)의 순서로 흐른다. 반면 $e_c > 0$ 인 경우는 c상 상단스위치 역병렬 다이오드가 on 되어 c상에 누설전류가 흐르기 시작한다. 이때 $v_a = v_{dc}$, $v_b = v_{dc}$, $v_c = v_{dc}$, $e_a = -e_b$ 이고 식(2)로부터 $v_n = v_{dc} - e_c/3$ 이 되어 c상 누설전류가 계속 흐르게 된다. 이 경우 누설전류를 정량적으로 분석해보면 다음과 같다.

$e_c > 0$ 인 구간에서 처음으로 하단 스위치가 off 되는 시간을 t_0 라고 하면 c상 상단스위치의 역병렬 다이오드로 흐르는 누설전류는 식(8)과 같다.

$$i_c(t) = -\frac{1}{R} \left(\frac{2e_c}{3} \right) (1 - e^{-\frac{R}{L}(t-t_0)}), \quad t \geq t_0 \quad (8)$$

이후 $t = t_1$ ($t_1 > t_0$)에서 b상 하단스위치가 다시 on 되면 $v_a = v_{dc}$, $v_b = 0$, $v_c = v_{dc}$, $e_a = -e_b$ 이 되고 식(2)로부터 $v_n = (2v_{dc} - e_c)/3$ 가 되며, c상 상단스위치의 역병렬 다이오드로 흐르는 누설전류는 식(9)와 같이 감소하게 된다.

$$i_c(t) = -\frac{1}{R} \left(\frac{2e_c}{3} \right) (1 - e^{-\frac{R}{L}(t_1-t_0)}) e^{-\frac{R}{L}(t-t_1)} + \frac{1}{R} \left(\frac{v_{dc} - 2e_c}{3} \right) (1 - e^{-\frac{R}{L}(t-t_1)}), \quad t \geq t_1 \quad (9)$$

이 누설전류가 0이 되는 시간 t_{off} 는 식(10)과 같으며 이때 $v_n = v_{dc}/2$ 이 되어 누설전류는 더 이상 흐를 수 없게 된다.

$$t_{off} = t_1 - \frac{L}{R} \ln \left(\frac{v_{dc} - 2 \cdot e_c}{v_{dc} - 2e_c \cdot e^{-\frac{R}{L}(t_1-t_0)}} \right) \quad (10)$$

이후 새로운 PWM 주기에서는 이상 설명한대로 반복하여 그림 7의 (a)→(b)→(d)→(a)→(b)→(d)의 순서로 누설전류가 흐르게 된다. 만약 t_{off} 이전에 새로운 PWM 주기가 시작되어 b상 하단스위치가 다시 off 되면 c상 누설전류는 식(11)과 같이 $i_c(t_2)$ 를 초기값으로 다시 증가하게 된다.

$$i_c(t) = i_c(t_2) e^{-\frac{R}{L}(t-t_2)} - \frac{1}{R} \left(\frac{2e_c}{3} \right) (1 - e^{-\frac{R}{L}(t-t_2)}) \quad (11)$$

이 경우 c상 누설전류는 연속이 되며 그림 7의 (a)→(b)→(d)→(b)→(d)의 순서로 누설전류가 흐르게 된다.

이상 설명한 바와 같이 하단스위치 구동방식에서는 개방된 상의 역기전력이 양수일 때 해당 상에 누설전류가 흐르게 됨을 알 수 있다. 즉 그림 6의 seg3과 seg6에서는 $e_a > 0$ 인 구간에서, seg2과 seg5에서는 $e_b > 0$ 인 구간에서, seg1과 seg4에서는 $e_c > 0$ 인 구간에서 해당 개방상의 상단 역병렬 다이오드를 통하여 누설전류가 흐른다.

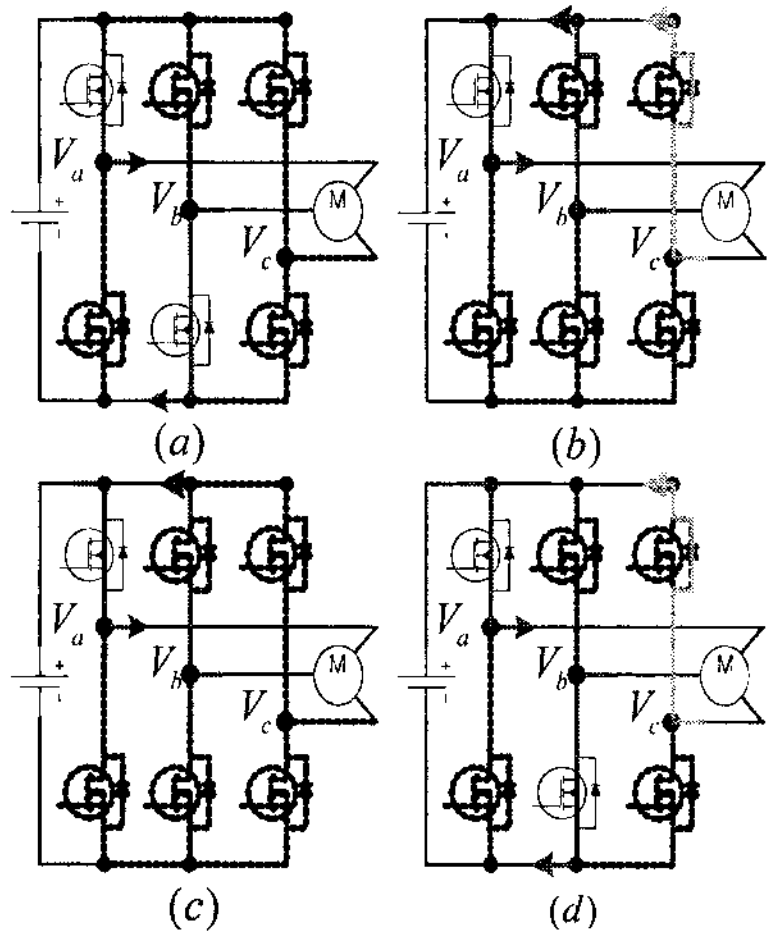


그림 7 인버터 회로의 전류흐름
Fig. 7 Current flow of the inverter circuit

2.2 Bipolar PWM 방식

그림 8은 상/하단 스위치를 동시에 구동하는 방식을 보인 것이다. a상에서 b상으로 전류가 흐르는 seg1의 구간을 예를 들어 보면 a상 상단스위치(A_{top})와 b상 하단스위치(B_{bottom})가 동시에 PWM 구동된다.

a상 상단스위치와 b상 하단스witch가 동시에 on 되면 $v_a = v_{dc}$, $v_b = 0$, $v_c = e_c + v_n$, $e_a = -e_b$ 이므로 식(2)로부터 $v_n = v_{dc}/2$ 가 되고, c상의 상/하단 스위치의 역병렬 다이오드는 off 되어 c상 전류는 0으로 유지된다. 이후 a상 상단스위치와 b상 하단스위치가 동시에 off 되면 a/b상 전류가 연속인 경우 a상 하단, b상 상단의 역병렬 다이오드가 on 되므로 $v_a = 0$, $v_b = v_{dc}$, $v_c = e_c + v_n$, $e_a = -e_b$ 이고 식(2)로부터 $v_n = v_{dc}/2$ 가 된다. 또한 c상의 상/하단스위치의 역병렬 다이오드는 off 되어 c상 전류는 0으로 유지된다. 즉 Bipolar PWM 방식의 경우는 개방된 상에 원치 않는 누설전류가 흐르는 경우는 없다.

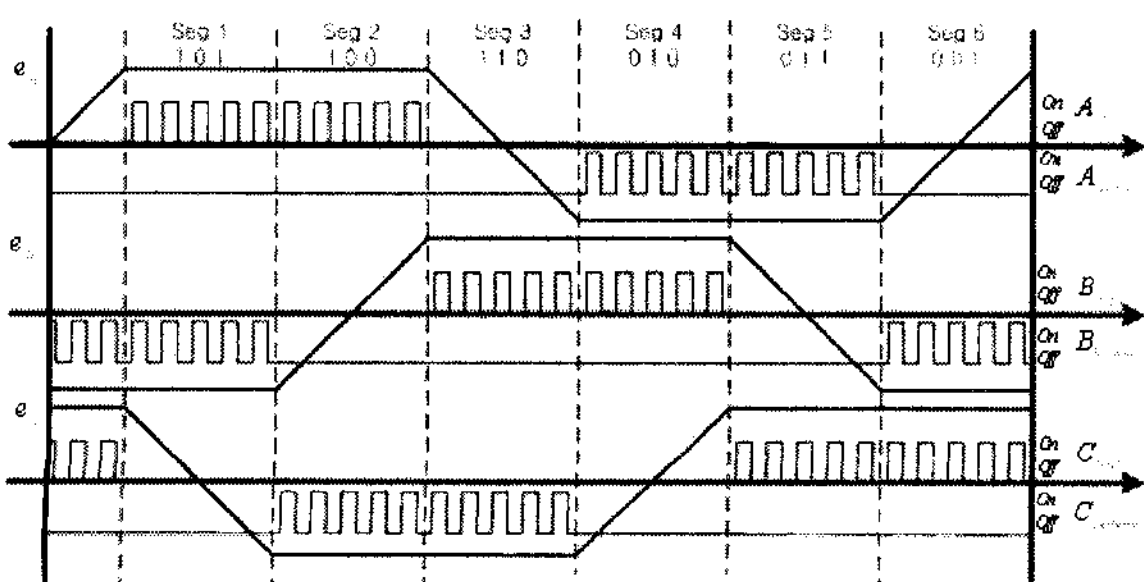


그림 8 Inverter circuit의 Bipolar 구동방식
Fig. 8 Bipolar driving of the inverter circuit

2.3 개선된 구동방식

앞에서 본 바와 같이 상단스위치 구동방식에서는 개방되는 상의 역기전력이 음일 때 누설 전류가 발생하고, 하단 스위치 구동방식에서는 개방되는 상의 역기전력이 양일 때 누설전류가 발생하였다. 그림 9의 seg1의 경우 A구간에서는 개방된 c상의 역기전력이 양의 값을 가지므로 a상의 상단스위치 구동방식을 사용하고, B구간에서는 개방된 상의 역기전력이 음의 값을 가지므로 b상의 하단스위치 구동방식을 사용한다. 이와 같이 개방된 상의 역기전력이 양인 구간에서는 상단스위치를, 음인 구간에서는 하단 스위치 구동방식을 사용함으로써 누설전류의 흐름을 제거할 수 있다.

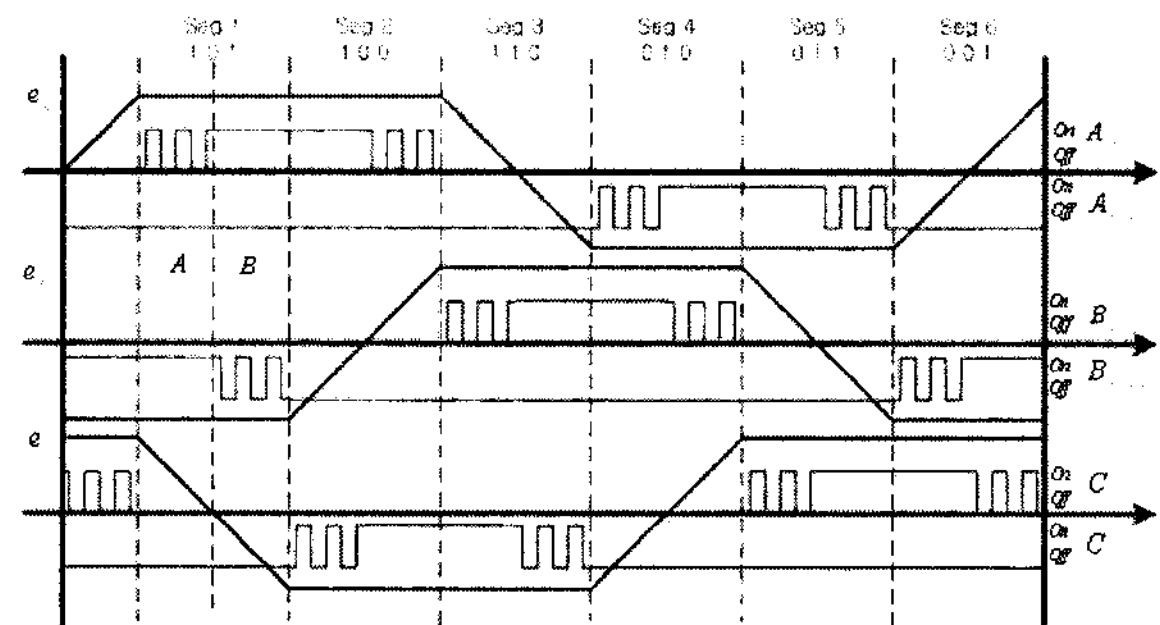


그림 9 개선된 unipolar 구동방식
Fig. 9 Improved Unipolar PWM driving

그림 9의 전 구간에 대한 구동방법을 표1과 같이 작성할 수 있다.

표 1 개선된 unipolar 구동방식

Table1 Improved Unipolar PWM driving

	역기전력의 부호	PWM 구동	On
Seg1	$e_c \geq 0$	A_{top}	B_{bottom}
	$e_c < 0$	B_{bottom}	A_{top}
Seg2	$e_b \geq 0$	C_{bottom}	A_{top}
	$e_c \geq 0$	A_{top}	C_{bottom}
Seg3	$e_a \geq 0$	B_{top}	C_{bottom}
	$e_a < 0$	C_{bottom}	B_{top}
Seg4	$e_c < 0$	A_{bottom}	B_{top}
	$e_c \geq 0$	B_{top}	A_{bottom}
Seg5	$e_b \geq 0$	C_{top}	A_{bottom}
	$e_b < 0$	A_{bottom}	C_{top}
Seg6	$e_a < 0$	B_{bottom}	C_{top}
	$e_a \geq 0$	C_{top}	B_{bottom}

3. 전동기 출력의 영향

누설전류의 흐르는 시간과 전동기출력의 영향을 정량적으로 분석하기 위해 MATLAB을 이용하였고, 시뮬레이션 및 실험에 쓰인 전동기는 표 2와 같다.

표 2 전동기 사양
Table 2 BLDC Motor specification

전동기	Maxon EC motor
용량	120 watt
선간 저항	1.26 Ω
선간 인덕턴스	0.32 mH
역기전력 상수	0.0190985 V · s/rad

상단스위치 구동방식에서 식(4)와 식(5)를 보면, 발생한 누설전류의 크기는 상단스위치가 off 구간에서 식(4)로 증가하고, 다시 상단스위치가 on 되는 구간에서 식(5)로 감소를 한다. 하단스위치 구동방식에서도 식(8)과 식(9)로 동일한 크기의 변화를 보이지만, 누설전류가 흐르는 방향만 반대이다. 그리고 식(6)과 식(10)은 누설전류가 흐르지 않게 되는 시간을 보인 것인데, 식(6)에서는 개방 상의 역기전력의 크기가 음이고, 식(10)은 개방 상의 역기전력의 크기가 양인 값이므로 식(6)과 식(10)은 동일한 결과식이 된다. 따라서 상단스위치 구동방식으로 발생된 누설전류의 흐름이 전동기 출력에 미치는 영향을 분석하겠다.

그림 10은 누설전류가 흐르는 시간구간을 $t_{flow} = t_{off} - t_0$ 라 할 때 시뮬레이션 한 결과로 전동기의 회전속도가 커지고, 스위치의 off 시간이 클수록, 시간 구간 t_{flow} 가 커짐을 보여준다. PWM 주기를 $T = 50 \mu s$ 일 때, 그림 10에서 $t_{flow} > T$ 의 경우 식(7)의 누설전류가 흐르는 경우가 된다.

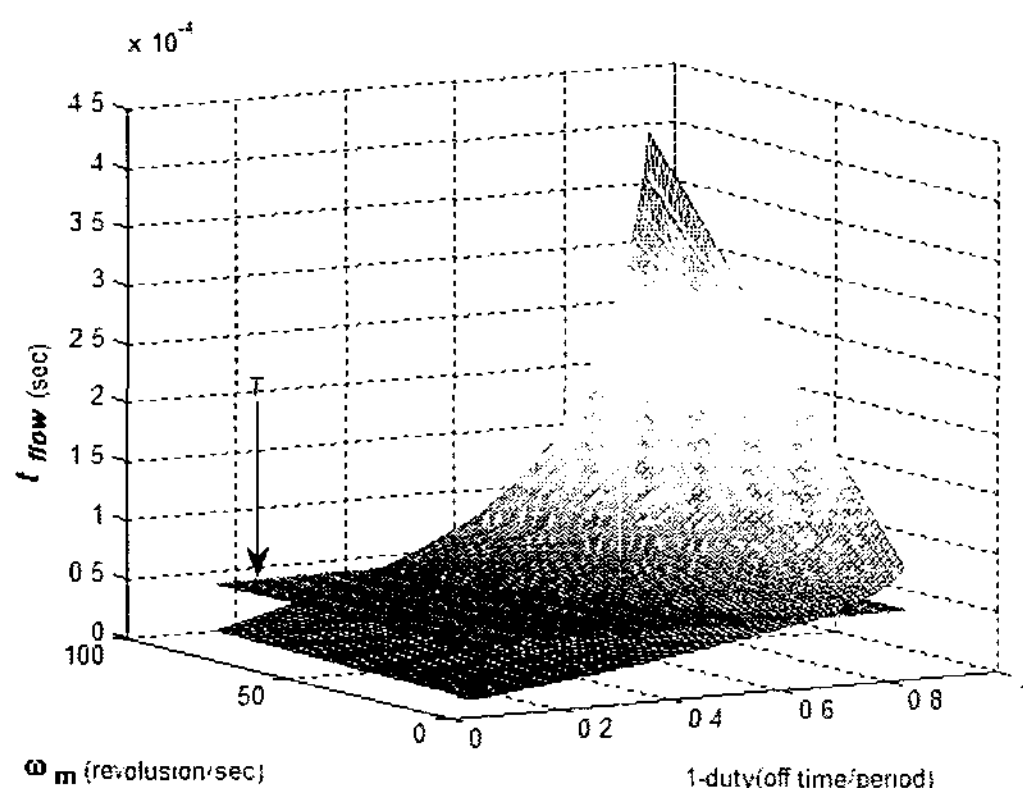


그림 10 누설전류가 흐르는 시간 구간 t_{flow}
Fig. 10 Time duration t_{flow} of the unwanted current

BLDC 전동기의 출력은 식(12)^[2]와 같다.

$$P_{out} = i_a \cdot e_a + i_b \cdot e_b + i_c \cdot e_c \quad (12)$$

예를 들면, 상단스위치 구동방식에서 a/b상으로 전류가 흐르는 seg1의 경우, 개방되는 c상의 역기전력 크기가 음인 전기각 30° 구간에서 양의 부호를 가지는 누설전류가 발생한다. 이때 식(12)의 각 항이 $i_a \cdot e_a > 0$, $i_b \cdot e_b > 0$ 이고, 누설전류로 인한 $i_c \cdot e_c < 0$ 항이 출력을 감소하는 영향을 준다. 이 영향을 정량적으로 분석하기 위해 전류제어가 되고, 전기각 60°동안 누설전류로 인한 손실항과 누설전류가 흐르지 않을 때 출력의 비를 백분율로 식(13)을 구성한 것이다.

$$\frac{P_{loss}}{P_{out}} = \frac{\left| \int_0^{\frac{\pi}{3}} i_c \cdot e_c d(\omega t) \right|}{\left| \int_0^{\frac{\pi}{3}} (i_a \cdot e_a + i_b \cdot e_b) d(\omega t) \right|} \times 100 \quad (13)$$

그림 11은 식(13)을 시뮬레이션을 통해 나타난 결과로 스위치 off 시간이 크고, 전동기의 회전속도가 빠른 무부하에 가까울수록 누설전류에 의한 손실이 커진다는 것을 나타내고 있다.

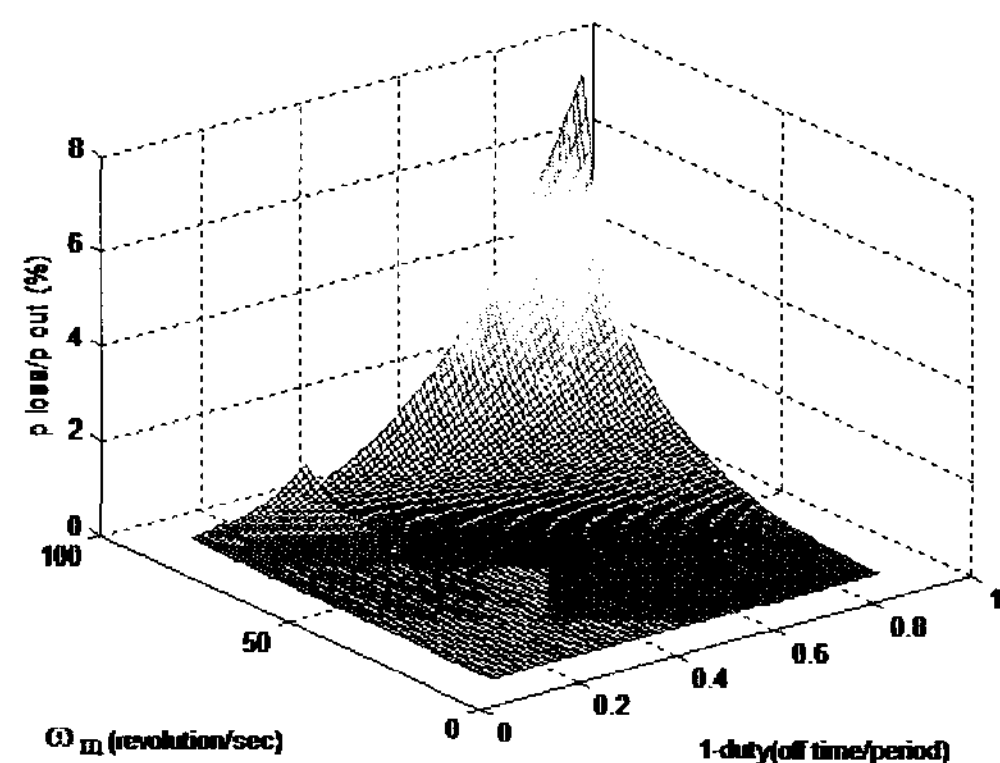


그림 11 전동기출력의 손실을
Fig. 11 Torque loss ratio

4. 시뮬레이션 및 실험결과

표 2의 전동기를 이용하여 $T = 50 \mu s$ (PWM 주기)일 때 PSIM을 통해 얻은 결과로 그림 12는 상단스위치 구동 방식에 대한 각 상의 누설전류의 흐름을 보인 것



그림 12 상단스위치 구동시 상전류
Fig. 12 Each phase current as the top switch driving

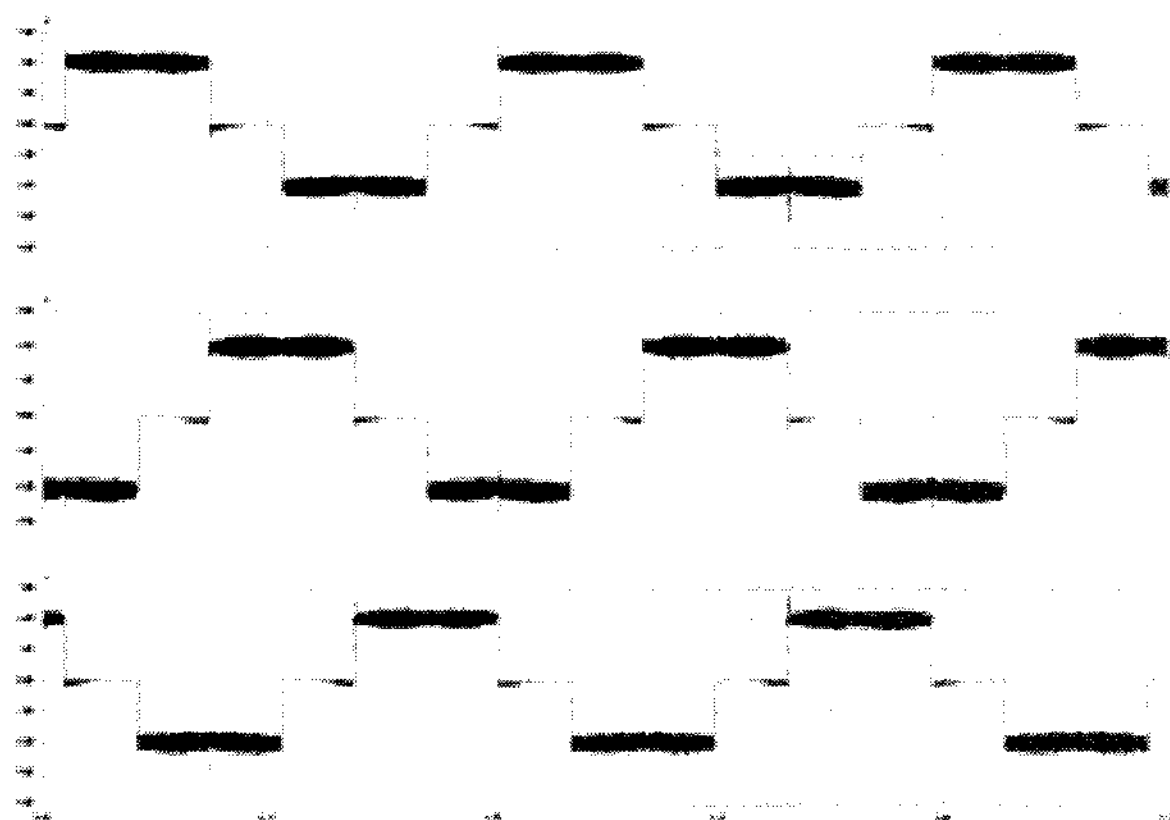


그림 13 하단스위치 구동시 각 상전류
Fig. 13 Each phase current as the bottom switch driving

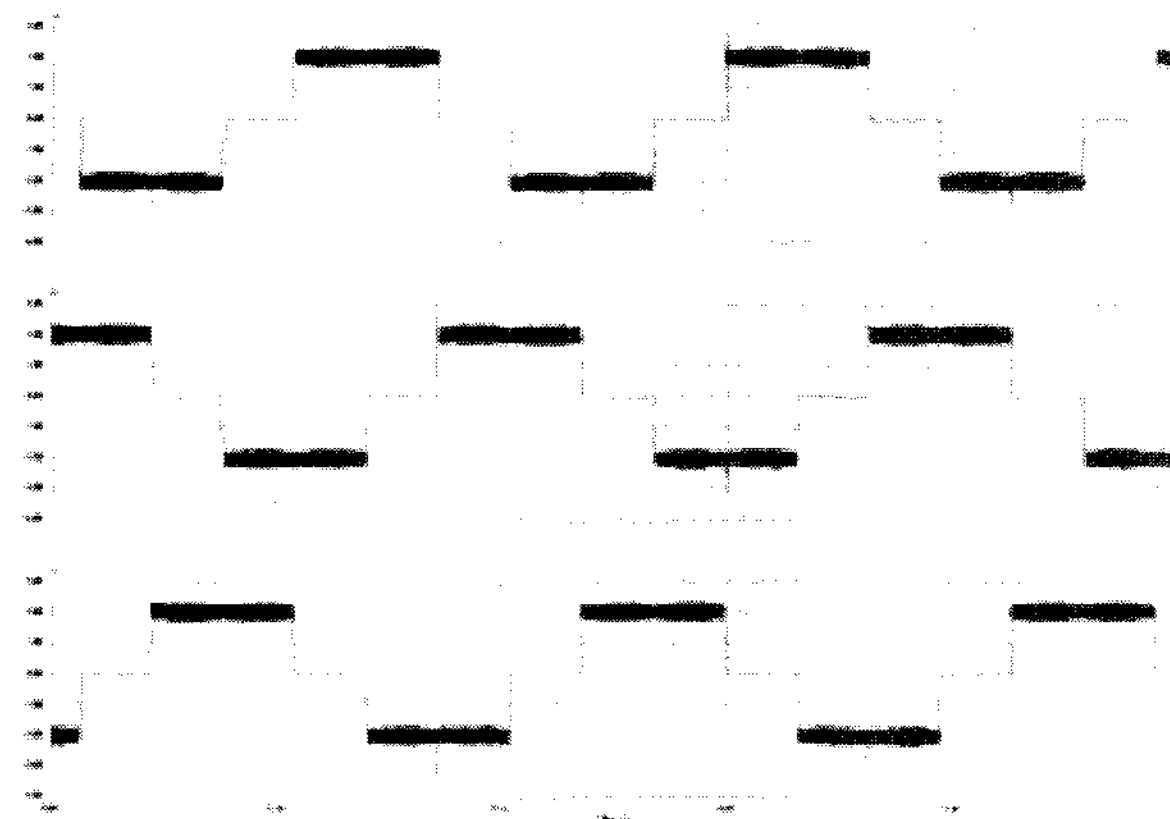


그림 14 개선된 구동방식에 의해 각상 전류
Fig. 14 Phase current as the improved Unipolar PWM driving

이고, 그림 13은 하단스위치 구동방식에 대한 각 상의 누설 전류의 흐름을 볼 수 있다.

그림 14는 PSIM 으로 개선된 구동방식을 적용하여 얻은 시뮬레이션 결과이다. 개선된 구동방식을 적용한 결과 각 상의 개방된 상태에서 누설전류의 흐름이 제거됨을 볼 수 있다.

실험을 위해서 TMS320F2812를 연산기로 사용하여 구동 알고리즘을 구현하고, 인버터 회로를 구동하였다. 그림 15는 상단스위치 구동방식의 결과상에 흐르는 실측 전류이고, 그림 16은 하단스위치 구동방식에 대한 상의 실측 전류를 나타낸다. 실험의 결과 개방된 상태에서 두 방법 모두 누설전류가 흐름을 볼 수 있었다. 그림 15는 상이 개방되는 구간에서 역기전력이 음으로 클수록 누설전류의 흐름이 크고, 역기전력의 부호가 양의 전압으로 바뀌는 지점에 가까워질수록 작아짐을 보이고 있다. 그림 15와 그림 16은 누설전류의 흐름을 잘 보여주기 위해서 무부하에 가까운 상태에서 실험을 한 것이다.

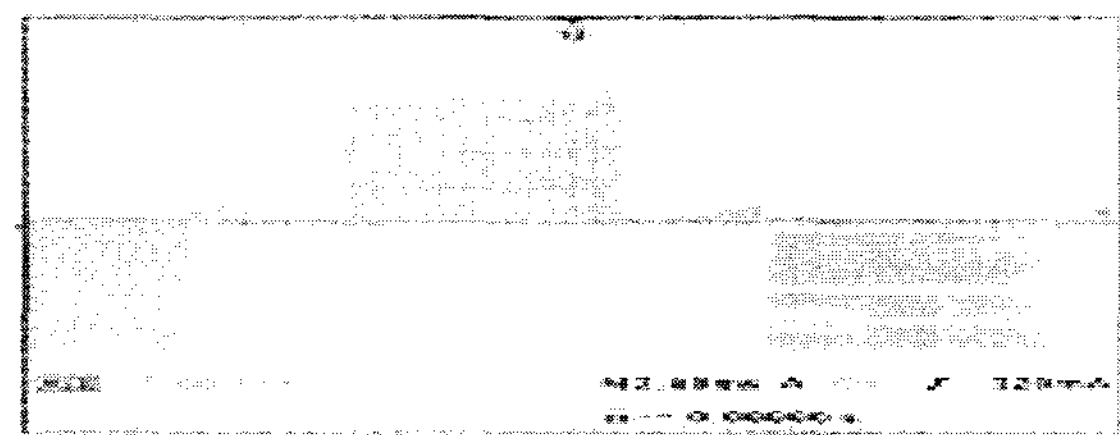


그림 15 상단스위치 구동방식에서 흐르는 상전류
Fig. 15 A phase current as the top switch driving

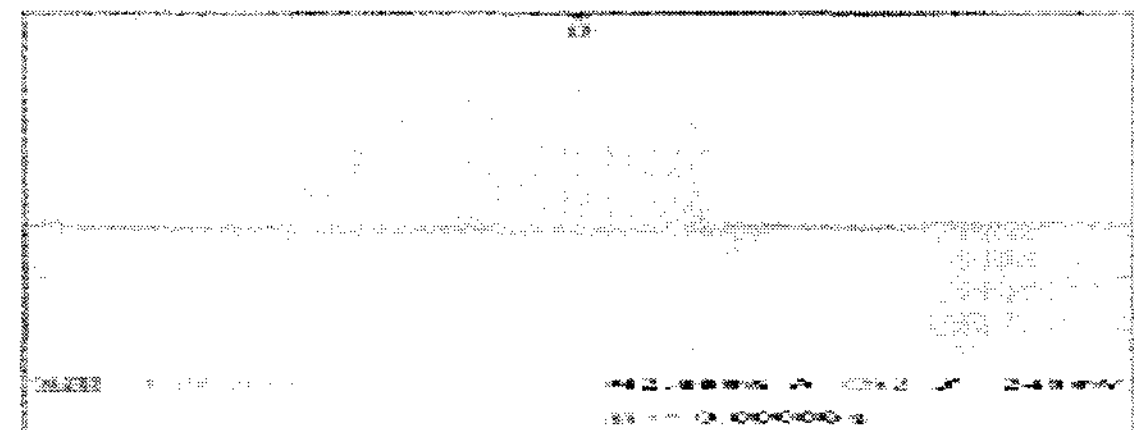


그림 16 하단스위치 구동방식에서 흐르는 상전류
Fig. 16 A phase current as the bottom switch driving

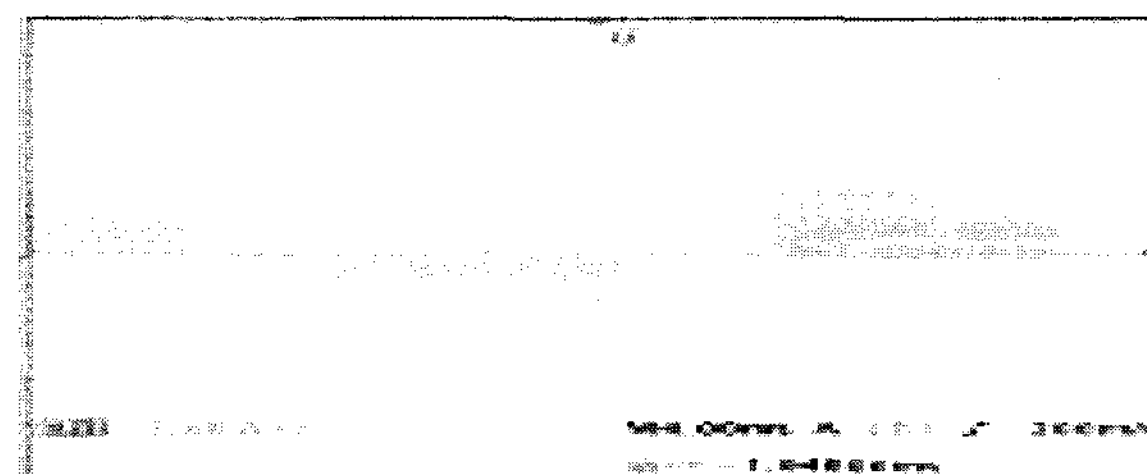


그림 17 개선된 구동방식에서 흐르는 상전류
Fig. 17 A phase current as the improved unipolar driving

그림 17은 개선된 구동방식을 이용하여 실험한 결과로 그림 15와 그림 16에서의 누설전류의 흐름이 없어진 것을 볼 수 있다. 개선된 구동방식을 사용하기 위해서는 개방상의 역기전력의 부호를 알아야 하는데, 본 연구에서는 위치센서를 이용하여 회전자 영구자석의 위치가 변하는 지점으로부터 전기각 30°인 곳을 부호가 변하는 지점으로 판단하였다. 역기전력의 부호가 바뀌는 지점을 계측 할 수 있는 회로를 부가하여 사용할 수도 있다. 추후 연구과제로 개선된 구동방식을 이용하여 위치센서가 없는 전동기의 속도추정을 위한 연구가 필요하다.

5. 결 론

본 논문에서는 Y 결선된 BLDC 전동기를 2상 여자 unipolar PWM방식으로 구동할 때 개방된 상의 역병렬 다이오드를 통해 흐르는 누설전류의 흐름을 제거할 수 있는 개선된 구동방식을 제안하였다. 누설전류의 흐름은 개방상의 역기전력의 부호에 따라 발생하므로, 개선된 구동방식은 역기전력의 부호를 판단하고 이에 따라 상단, 하 단 스위치를 선택적으로 구동함으로 누설전류의 흐름을 제거하고, 전동기 출력손실을 줄일 수 있었다. 시뮬레이션 결과와 실험결과로 개선된 구동방식이 누설 전류의 흐름을 제거하고 전동기 출력의 손실을 줄일 수 있음을 확인하였다.

이 논문은 2007년 광운대학교의 연구비 지원에 의하여 연구 되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] J.R. Hendershot Jr and THE Miller, "Design Of Brushless Permanent-Magnet Motors", *MAGNA Physics and OXFORD Physics Publications*, pp. 2-27 ~2-38, pp. 10-1~10-8, 1994.
- [2] Kwang-Woon Lee, Jung-Bae Park, Hyeong-Gee Yeo, Ji-Yoon yoo, Hyun-Min Jo, "Current Control Algorithm To Reduce Torque Ripple In Brushless DC Motors", *ICPE'98 국제학술대회논문집*, pp. 380-385, 1998, 10.
- [3] Tae-Sung Kim, Sung-Chan Ahn, Dong-Seok Hyun, "BLDC 전동기의 토크리플 저감을 위한 새로운 전류 제어 알고리즘에 대한 연구", *전력전자학회 논문지*, 제6권, 제5호, pp. 416-422, 2001, 10.

저 자 소 개



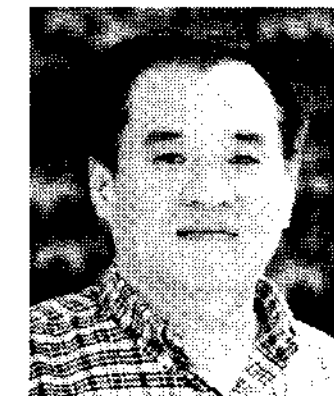
전용호(全龍鎬)

1968년 8월 21일생. 1996년 광운대 제어계측공학과 졸업. 1998년 동 대학원 제어계측공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 박사과정.



조 황(趙 滉)

1959년 1월 7일생. 1981년 인하대 기계공학과 졸업. 1985년 University of Texas Austin 기계공학과 졸업(석사). 1989년 동 대학원 기계공학과 졸업(공학박). 1990년 3월~현재 광운대 정보제어공학과 교수.



최 익(崔 翼)

1956년 6월 5일생. 1979년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1981년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1982년~2003년 한국과학기술연구원 지능제어연구센터 책임연구원. 2003년~현재 광운대 정보제어공학과 교수. 당 학회 감사.