http://dx.doi.org/10.6113/TKPE.2015.20.2.193

BLDCM의 회생제동을 위한 스위칭 방식에 관한 연구

김용휴[1], 박성준[2], 정준형[2], 김동윤[2], 김장목†

Research of PWM Modulation for Regeneration Braking of BLDC Motor

Yong-Hyu Kim[1], Sung-Jun Park[2], Jun-Hyung Jung[2], Dong-Youn Kim[2], and Jang-Mok Kim†

Abstract

This paper proposes a regeneration braking algorithm for Brushless DC (BLDC) motor system. The unipolar switching method has a limitation about the regeneration braking when the BLDC motor is operated in the low speed region. The proposed algorithm alternatively utilizes the unipolar and bipolar switching method to implement the regeneration braking for overall speed range. The bipolar switching method is used when the BLDC motor is operated in the low speed region. The switching transition point is determined by analyzing the unipolar and bipolar switching during the regeneration braking. The effectiveness of proposed algorithm is verified by using the experimental results.

Key words: Regenerative braking, BLDCM regeneration braking, Unipolar switching, Bipolar switching

1. 서 론

전동 휠체어, 전기 자전거와 같은 LEV(Light Electric Vehicle)에는 주로 BLDC 전동기가 사용된다. BLDC 전동기는 2상 여자 방식으로 120도 도통 제어를 통해 제어를 하며, 전동기의 내부에 3개의 홀센서를 부착하여 회전자의 위치를 판별하므로 공간적인 제약이 크게 감소할 뿐 아니라 비교적 낮은 가격으로 간단하게 제어기를 구성 할 수 있다. 전동 휠체어와 같은 이동기기는 배터리를 에너지원으로 사용하기 때문에 제한된 배터리 용량으로 인한 주행거리의 제약을 받게 된다. 이러한 문제를 개선하기 위해 전동기 제동 시 운동에너지를 전기에너지로 변환하여 배터리를 충전하는 방식인 회생제동에 대한 연구가 진행되었으며 실제 이동기기에 적용하고 있는 추세이다[1]-[4].

BLDC 전동기의 회생제동은 스위칭 방식에 따라 충전 특성이 다르게 나타난다. 일반적으로 PWM 스위칭 방식은 유니폴라(Unipolar) 방식과 바이폴라(Bipolar) 방식이 주로 사용된다. 유니폴라 스위칭 방식은 하나의 스위치만을 PWM 동작하여 DC/DC 부스트 컨버터와 유사한 방식으로 입력전압의 역기전력을 승압하여 배터리로 충전하는 방식이다.[5]-[8] 바이폴라 스위칭 방식은 두 상의 스위치를 동시에 PWM 동작하여 모터 내부 권선에 흐르는 전류를 제어하면서 배터리로 에너지를 흡수한다[9]-[11].

기존의 BLDC 전동기를 이용한 회생제동에 관한 연구들은 특정 운전 속도 조건을 만족하는 영역에서만 회생제동을 사용하여 회생 에너지 및 제동력을 획득한다. 왜냐하면 저속 운전 조건에서는 상대적으로 낮은 역기전력으로 인해 회생제동을 통해 획득 가능한 에너지와 제동력이 낮기 때문이다. 이러한 이유로 전체 운전 영역에서 회생제동을 효과적으로 사용하지 못한다는 단점을 가지고 있다. 또한 회생제동이 가능한 운전 영역에 대한 명확한 기준을 제시하지 않았다.

본 논문에서는 이러한 문제점을 개선하기 위해 전체 운전 영역에서 효과적으로 회생제동을 사용하기 위한 알고리즘을 제안한다. BLDC 전동기의 회생제동에 사용되는 유니폴라 및 바이폴라 스위칭 방식의 장, 단점을 비교, 분석하였으며 이를 통해 전체 운전 속도 영역에서 회생 에너지의 충전과 제동력을 모두 고려한 회생제동 알고리즘을 제안하였다. 제안된 알고리즘은 실험 결과를 통해 타당성을 입증하였다.

Paper number: TKPE-2015-20-2-12
Print ISSN: 1229-2214 Online ISSN: 2288-6281
† Corresponding author: jmok@pusan.ac.kr, Dept. of Electrical Eng., Pusan National University
Tel: +82-51-510-2366 Fax: +82-51-510-0212
[1] Automotive Parts Technology Support Center, Busan Techno-Park
[2] Dept. of Electrical Eng., Pusan National University
Manuscript received Jul. 7, 2014; accepted Mar. 12, 2015

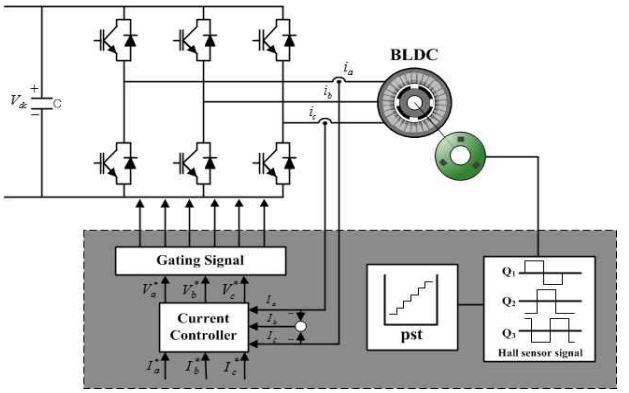

Fig. 1. 3-phase BLDC motor control system.

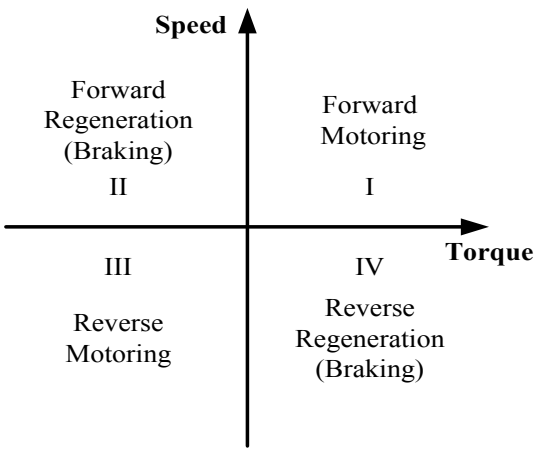

Fig. 2. Four-quadrant operation.

2. BLDCM 전동기의 시스템 구성 및 회생제동 스위칭 방식별 해석

2.1 BLDC 전동기 시스템 구성

그림 1에서는 3상 BLDC 전동기 구동 시스템을 나타냈다. 전체 시스템 구성은 DC단 캐패시터, PWM 인버터(PWM Inverter), 홀 센서(Hall effect sensor), 상전류 측정을 위한 전류센서 및 전동기 제어를 위한 제어기로 구성되어 있다.

그림 2는 전동기의 속도-토크에 따른 4상한 운전(four-quadrant operation)에 대한 그림이며 그림 3은 전동기 운전과 회생 운전시 BLDC 전동기의 역기전력과 상전류에 대해 나타냈다. 전동기가 정/역 운전을 하는 1, 3사 분면은 발생되는 역기전력과 상전류의 부호가 서로 같다. 반면에 2, 4사 분면은 전동기의 회생제동 운전영역이다. 이 경우 발생되는 역기전력과 전류의 방향이 서로 다르기 때문에 에너지의 흐름이 역으로 발생된다.

2.2 BLDC 전동기의 회생제동 동작

회생제동에 사용되는 유니폴라(Unipolar) 스위칭 방식에 대한 동작은 그림 4 (a),(b)를 통해 확인 할 수 있다.

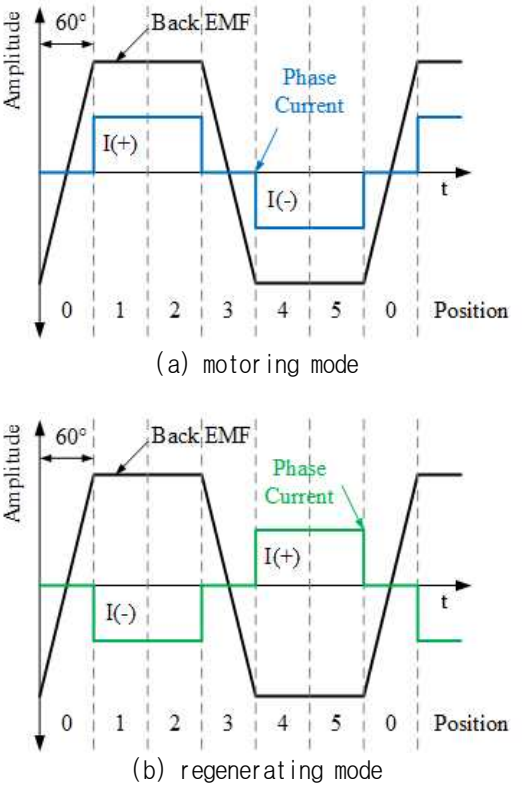

Fig. 3. BLDC motor operation.

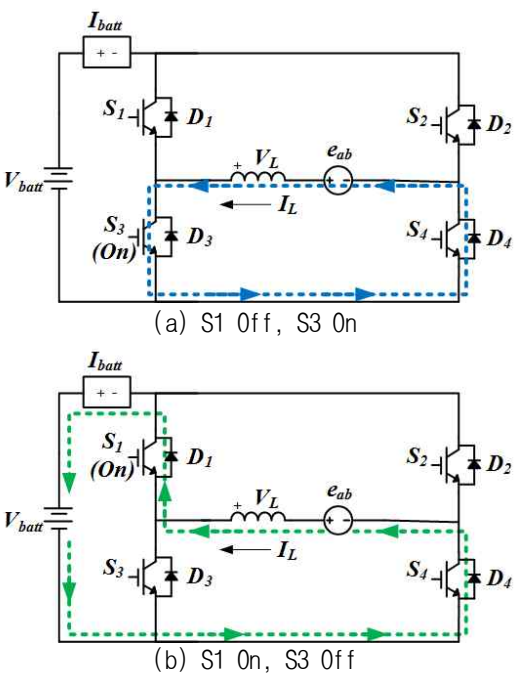

Fig. 4. Unipolar switching.

유니폴라 스위칭 방식은 DC/DC 부스트 컨버터 동작과 유사하다. 입력전원은 운동 에너지에 의해 발생되는 역기전력이며, 발생되는 역기전력을 승압하여 배터리로 전류를 인가하는 방식이다. PWM On 동작 시 스위치(S_3)가 턴 온(turn-on)되며, 이때 역기전력에 의해 발

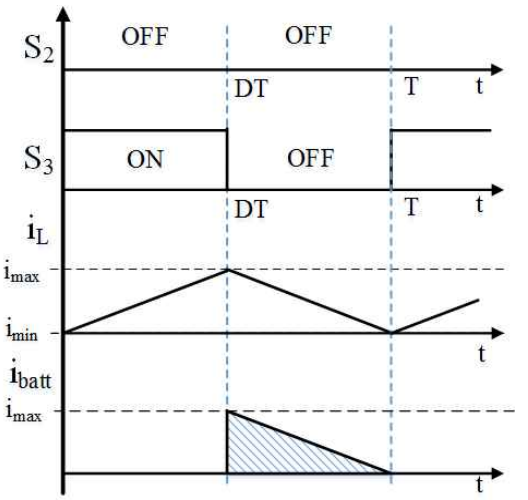

Fig. 5. Current waveform by the unipolar switching.

생되는 에너지가 모터 내부 권선에 인가된다. PWM Off 동작 시 스위치(S_3)가 턴 오프(turn-off)되며, 이때 다이오드(D_1, D_4)를 통해 모터 내부권선에 축적된 에너지가 배터리로 회생된다. PWM On 동작 시 역기전력 eab에 의해 모터 내부 권선에 인가되는 전류 i_L은 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다. 식에서 D는 PWM On-time 비율, T는 PWM 스위칭 주기이며, L은 모터 내부 인덕턴스이다.

$$i_L(t) = i_L(DT) = i_{\max} = -\frac{1}{L}\int_0^{DT} e_{ab}.dt + i_{\min} \quad (1)$$

$$i_{\max} = -\frac{e_{ab}}{L}DT + i_{\min}\ [A] \quad (2)$$

PWM off 동작 시 배터리의 회생제동으로 인해 감소되는 전류는 식 (4)로 나타낼 수 있다. Vbatt은 배터리 전압이다.

$$i_L(t) = i_L(T) = i_{\min} = \frac{1}{L}\int_{DT}^{T} (V_{batt} - e_{ab}).dt + i_{\max} \quad (3)$$

$$i_{\min} = \frac{V_{batt} - e_{ab}}{L}(1-D)T + i_{\max}\ [A] \quad (4)$$

회생제동에 사용되는 바이폴라 스위칭 방식에 대한 동작은 그림 6에서 나타내었다.

바이폴라 스위칭 방식은 전동기 운전에 사용되는 방식과 동일하게 제어가 된다. 입력전원은 배터리와 역기전력이며, 배터리와 역기전력에 의해 모터 내부 권선에 인가되는 전류를 제어하는 방식이다. PWM On 동작 시 스위치(S_2, S_3)가 턴 온(turn-on)되며, 이때 배터리와 역기전력에 의해 발생되는 전류가 모터 내부 권선에 인가

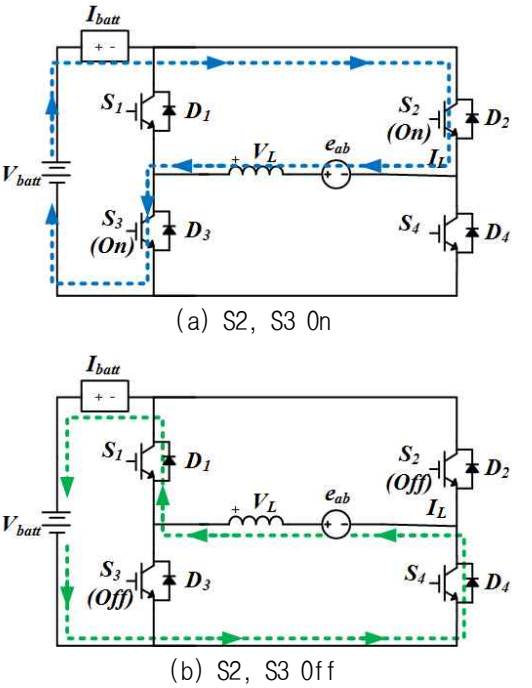

Fig. 6. Bipolar switching.

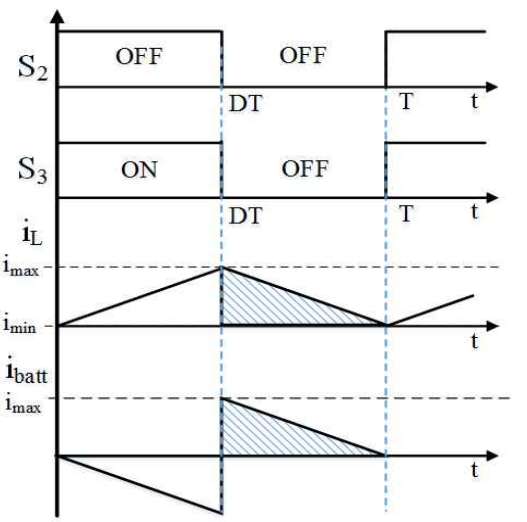

Fig. 7. Current waveform by the bipolar switching.

된다. PWM Off 동작 시 스위치(S_2, S_3)가 턴 오프(trun-off)되며, 이때 다이오드(D_1, D_4)를 통해 모터 내부 권선에 인가된 에너지가 배터리로 회생된다. PWM on 동작 시 배터리와 역기전력에 의해 모터 내부 권선에 인가되는 전류는 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$i_L(t) = i_L(DT) = i_{\max} = -\frac{1}{L}\int_0^{DT} (V_{batt} + e_{ab}).dt + i_{\min} \quad (5)$$

$$i_{\max} = -\frac{V_{batt} + e_{ab}}{L}DT + i_{\min}\ [A] \quad (6)$$

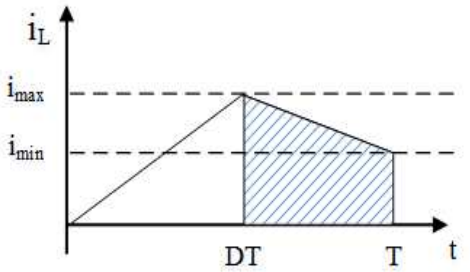

Fig. 8. Regeneration braking energy(unipolar switching).

PWM off 동작 시 배터리의 회생제동으로 감소되는 전류는 식 (8)로 나타낼 수 있다.

$$i_L(t) = i_L(T) = i_{\min} = \frac{1}{L}\int_{DT}^{T}(V_{batt} - e_{ab}).dt + i_{\max} \quad (7)$$

$$i_{\min} = \frac{V_{batt} - e_{ab}}{L}(1-D)T + i_{\max}\ [A] \quad (8)$$

2.3 스위칭 방식에 따른 회생 에너지량

유니폴라 스위칭 방식으로 회생제동 시 배터리로 인가되는 전압은 식 (2)와 식 (4)의 연립방정식을 통해 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다. 식 (10)은 유니폴라 스위칭 방식으로 회생제동을 동작하기 위한 조건 나타내었다.

$$\frac{V_{batt} - e_{ab}}{L}(1-D)T - \frac{e_{ab}}{L}DT = 0 \quad (9)$$

$$V_{RG} = V_{batt} - \frac{e_{ab}}{1-D} \quad < 0 \quad (10)$$

회생 에너지양은 PWM Off 동작 시 배터리로 인가되는 전하량과 회생제동 시 발생되는 전압(V_{RG})의 곱으로 나타낼 수 있다.

식 (10)에서 역기전력에 의해 승압되는 전압이 배터리 전압보다 높아야 회생된다는 것을 확인 할 수 있다.

$$Q_{uni_off} = \frac{1}{2}(i_{\max} + i_{\min})(1-D)T\ [C] \quad (12)$$

$$P_{RG_uni} = V_{RG} \times Q_{uni_off}\ [J] \quad (13)$$

식 (12)는 유니폴라 스위칭 방식을 사용하는 경우 배터리로 회생되는 전하량(Quni_off)에 대한 식이며, 식 (13)은 유니폴라 스위칭을 통한 회생 에너지(P_{RG})에 대한 식이다. 바이폴라 스위칭 방식으로 회생제동 시 배터리로 인가되는 전압은 식 (6)과 식 (8)의 연립방정식을 통해 식 (14)로 나타낼 수 있다. 식 (15)는 바이폴라 스위칭 방식으로 회생제동을 동작하기 위한 조건에 대해 식으로 나타내었다.

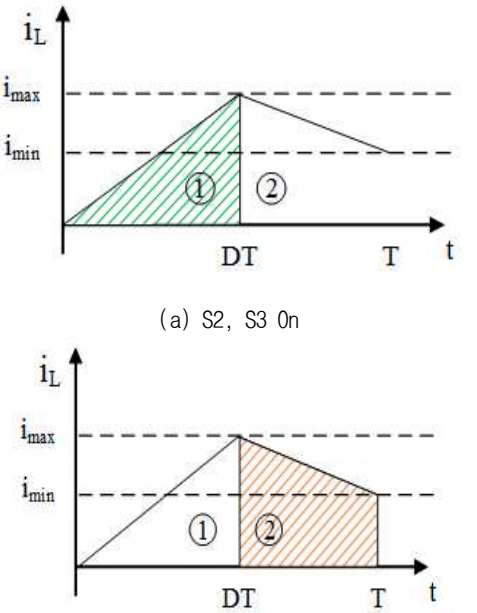

Fig. 9. Regeneration braking energy(Bipolar switching).

$$\frac{e_{ab} - V_{batt}}{L}(1-D)T - \frac{V_{batt} + e_{ab}}{L}DT = 0 \quad (14)$$

$$V_{RG} = V_{batt} - \frac{e_{ab}}{1-2D} \quad < 0 \quad (15)$$

$$Q_{bi_on} = \frac{1}{2}(i_{\max} + i_0) \times DT\ [C] \quad (16)$$

$$Q_{bi_off} = \frac{1}{2}(i_{\max} + i_{\min}) \times (1-D)T\ [C] \quad (17)$$

$$Q_{bi_RG} = Q_{bi_on} - Q_{bi_off}\ [C] \quad (18)$$

바이폴라 스위칭 방식은 유니폴라 스위칭 방식과 다르게 PWM On 동작 시 배터리에서 출력되는 전하량(Qbi_on)과 PWM Off 동작 시 배터리로 회생되는 전하량(Qbi_off)의 차이가 배터리로 충전되는 회생 에너지이다.

식 (16)은 PWM On 동작 시 배터리에서 출력되는 전하량에 대한 식이다. 식 (17)은 PWM Off 동작 시 배터리로 충전되는 전하량에 대한 식이다. 식 (19)는 바이폴라 스위칭 방식을 통한 회생 에너지(Pbi_RG)에 대한 식이다.

$$P_{bi_RG} = V_{RG} \times Q_{bi_RG}\ [J] \quad (19)$$

위에서 설명된 내용을 정리하여 스위칭 방식에 따른 회생제동의 차이를 비교 할 수 있다. 유니폴라 스위칭 방식은 역기전력을 승압하여 배터리로 충전하기 때문에 회생에너지 흡수에 적합한 스위칭 방식이지만, 제동력을

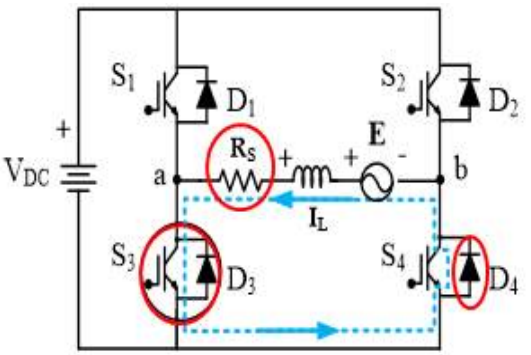

Fig. 10. Back-emf change on different speed.

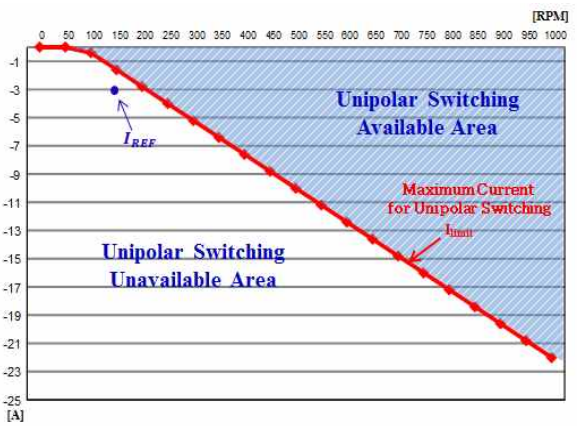

Fig. 11. Switching selection of regeneration braking.

얻기에는 역기전력에 의해 발생 가능한 전류의 최대값이 낮기 때문에 제동 영역의 범위가 좁은 단점이 있다.

바이폴라 스위칭 방식은 배터리의 에너지를 소비하여 전류를 제어하기 때문에 회생 에너지의 흡수보다는 제동 제어에 적합한 스위칭 방식이다.

3. 회생제동 스위칭 방식의 한계 및 제안하는 회생제동 제어 방식

3.1 스위칭 방식의 한계

유니폴라 스위칭 방식으로 회생제동을 동작하기 위해서는 발생되는 역기전력이 환류 다이오드를 도통하는 전류를 생성 할 수 있을 만큼 커야 한다.

식 (20)에서는 유니폴라 스위칭 방식을 사용하는 경우 회생제동으로 발생 가능한 전류에 대해 나타내었다.

$$i_{limit} = \frac{e_{ab} - v_F}{R_s + R_{on} + R_D} \tag{20}$$

식 (20)에 나타난 식의 v_F는 다이오드 강하 전압, R_S는 전동기 권선 저항, R_{on}은 MOSFET On 저항, R_D는 다이오드 내부 저항이다. 유니폴라 스위칭 방식을 사용하여 회생제동을 구현 할 경우 역기전력에 따라 제어 가능한 영역이 그림 11과 같이 나타난다. I_{limit}는 유니폴라 스위칭 방식으로 제어 가능한 최대 전류이다.

바이폴라 스위칭 방식은 유니폴라 스위칭 방식과 다르게 입력전원이 배터리 성분을 사용하기에 저속 영역에서도 높은 전류지령의 제어가 가능하다. 하지만 역기전력이 낮은 구간에서 스위칭시 PWM On 동작과 Off 동작 시 전류의 기울기가 식(21)에 보이는 것과 같이 동일하게 된다.

$$\begin{aligned} i_{\max} &= -\frac{V_{batt}}{L} DT + i_{\min} \\ i_{\min} &= \frac{V_{batt}}{L}(1-D)T + i_{\max} \end{aligned} \tag{21}$$

바이폴라 스위칭 방식을 이용하여 저속에서 회생제동을 사용하면 배터리로 회생되는 에너지보다 소비되는 에너지양이 더 많다. 이러한 문제는 모터 내부의 R-L회로의 응답 특성으로 인해 PWM On 동작 시 발생하는 전류의 면적과 PWM Off 동작 시 발생하는 전류의 면적의 차이가 발생하기 때문이다. 식 (22)는 R-L 회로에 대한 식이다.

$$i(t) = \frac{V_{batt} - e_{ab}}{R}(1 - e^{-\frac{L}{R}t}) \tag{22}$$

3.2 제안하는 회생제동 제어 전략

기존 회생제동에 관한 연구들은 회생제동 제어를 특정 속도 조건을 만족 할 때 회생에너지 및 회생제동력을 획득하였다. 특정 속도 이하 영역에서는 회생에너지 및 회생제동을 통해 획득 가능한 제동력이 낮기 때문이다. 저속 영역에서 이러한 문제점이 존재하기 때문에 특정 속도 조건 이상에서 회생제동을 동작하여 회생 에너지 및 회생제동력을 획득하는 방식을 사용하고 있다.

제안하는 방식은 회생제동 동작 조건을 특정 속도가 아닌 유니폴라 스위칭 방식의 제어 가능한 영역을 기준으로 스위칭 방식을 변경하여 회생제동 제어를 하는 방식을 제안한다. 유니폴라 스위칭 방식으로 제어가 가능한 영역에서는 유니폴라 스위칭 방식으로 배터리로 회생 에너지를 흡수하며, 제어가 불가능한 영역에서는 바이폴라 스위칭 방식을 사용하여 유니폴라 스위칭이 제어 못하는 저속 영역에서 제어하도록 알고리즘을 설계하였다. 제안하는 방식을 통해 전체 운전 영역에서 회생 에너지의 흡수와 회생 제동력을 획득 할 수 있다.

4. 실 험

회생제동시 유니폴라 스위칭 방식과 바이폴라 스위칭 방식에 대한 이론을 검증하기 위한 실험을 BLDC 전동

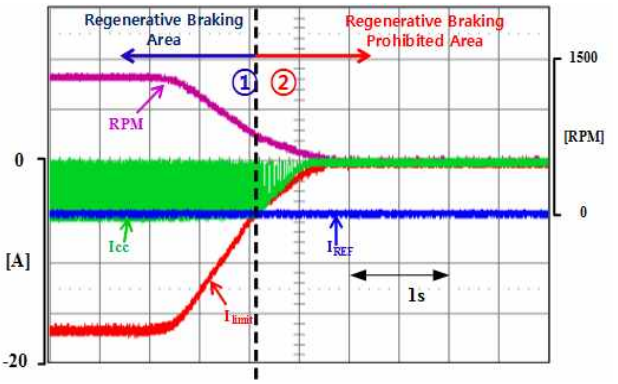

Fig. 12. Current waveform with the unipolar switching.

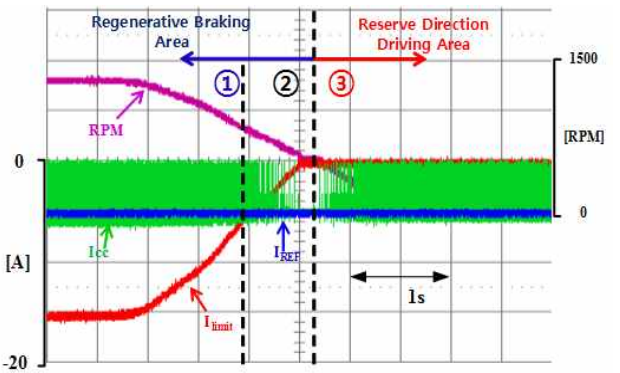

Fig. 13. Current waveform with the bipolar switching.

기의 파라미터를 측정하여 진행하였다.

그림 12는 유니폴라 스위칭 방식이 사용된 회생제동에 대한 파형이다. 속도가 감소함에 따라 제어 가능한 최대 전류(I_{Limit})가 감소하는 것을 확인할 수 있다. 제어 가능한 최대 전류(I_{Limit})가 점점 감소하여 회생제동 전류 지령(I_{REF})보다 낮아질 때 제어가 안 되는 것을 확인 할 수 있다.

그림 13은 바이폴라 스위칭 방식이 사용된 회생제동에 대한 파형이다. 입력전압의 배터리 성분을 사용하여 전류를 제어하기 때문에 저속영역에서 유니폴라 스위칭 방식으로 제어가 안되는 영역에서 전류 제어가 잘되는 것을 확인 할 수 있다.

그림 14는 본 논문에서 제안하는 회생 제동 스위칭 제어 전략에 대한 파형이다. 기존의 유니폴라 스위칭 방식으로 제어가 되지 않는 영역에서 바이폴라 스위칭 방식으로 변환하여 저속에서도 회생제동 제어가 되는 것을 확인 할 수 있다. 전동기의 파라미터 측정을 통해 유니폴라 스위칭 방식의 속도에 따른 제어영역을 확인하였으며, 유니폴라 스위칭 방식으로 제어가 불가능한 영역에서는 바이폴라 스위칭 방식으로 전환하여 전체 회생영역에서 제어가 가능한 것을 실험을 통해 검증 하였다.

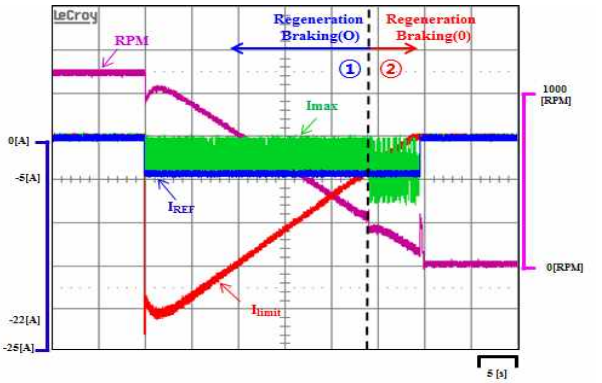

Fig. 14. Regeneration braking control with change of switching.

5. 결 론

본 논문에서는 BLDC 전동기의 회생 제동 운전에 사용되는 유니폴라와 바이폴라 스위칭 방식의 장/단점을 비교 분석하였으며, 이를 기반으로 일정한 제동력이 요구되는 BLDC 전동기 시스템에서의 새로운 회생제동 알고리즘을 제안하였다. 제안된 알고리즘은 속도가 높은 운전 영역에서는 에너지 회생율이 높은 유니폴라 스위칭 방식으로 운전하고, 속도가 낮은 저속 영역에서는 전동기의 일정한 제동력 확보가 가능한 바이폴라 스위칭 방식을 통해 운전한다. 이를 통해 효과적인 회생제동 운전이 가능하다. 본 연구에 대한 이론적 해석은 실험을 통하여 검증하였다.

이 논문은 2012년도 교육부와 한국연구재단의 지역혁신인력양성사업의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2012026153)

References

[1] K. Yoong, Y. H. Gan, G. D. Gan, C. K. Leong, Z. Y. Phuan, B. K. Cheah, and K. W. Chew, “Studies of regenerative braking in electric vehicle,” in *Proc. IEEE Conf. Sustainable Utilization Develop. Eng. Technol., Malaysia*, pp. 40 - 45, Nov. 2010.

[2] N. Mutoh, “Driving and braking torque distribution methods for frontand rear-wheel-independent drive-type electric vehicles on roads with low friction coefficient,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Vol. 59, No. 10, pp. 3919 - 3933, Oct. 2012.

[3] J. W. Dixon and M. E. Ortlizar, “Ultracapacitors + DC-DC converters in regenerative braking system,” *IEEE Aerosp. Electron. Syst. Mag.*, Vol. 17, No. 8, pp. 16-21, Aug. 2002.

[4] J. W. Dixon, M. Ortuzr, and E. Wiechmann, “Regenerative braking for an electric vehicle using

ultracapacitors and a buck-boost converter," *Proc. EVS18*, pp. 148, 2001.

[5] J. Zhang, S. Li, G. Lu, and Q. Zhou, "A novel regenerative braking method of BLDCM for wheeled mobile robot," *2010 IEEE International Conference on Information and Automation(ICIA)*, 2010.

[6] S. M. Sue, Y. S. Huang, J. S. Syu, and C. Y. Sun, "A bi-directional power flow IPM-BLDC motor drive for electrical scooters," *2010 the 5th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications(ICIEA)*, 2010.

[7] T. S. Kim, S. C. Ahn, and D. S. Hyun, "A new current control algorithm for torque ripple reduction of BLDC motors," *Transactions of Korean Institute of Power Electronics*, Vol. 6, No. 5, pp. 416-422, Oct. 2001.

[8] Y. H. Jeon, W. Cho, and I. Choy, "An improved unipolar PWM method for BLDC motors," *Transactions of Korean Institute of Power Electronics*, Vol. 13, No. 3, pp. 221-228, June 2008.

[9] M. J. Yang, H. L. Jhou, B. Y. Ma, and K. K. Shyu, "A cost-effective method of electric brake with energy regeneration for electric vehicles," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 56, No. 6, pp. 2203-2212, June 2009.

[10] P. B, Bobba, K. R. Rajagopal, "Compact regenerative braking scheme for a PM BLDC motor driven electric two-wheeler," Joint International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES) & 2010 Power India.

[11] H. W. Kim, H. K. Shin, H. S. Mok, Y. K. Lee, and K. Y. Cho, "Novel PWM method with low rippl current forposition control applications of BLDC motors," *Journal of Power Electronics*, Vol. 11, No. 5, pp. 726-733, Sep. 2011.

김용휴(金龍烋)

1979년 4월 5일생. 2004년 군산대 전자공학과 졸업. 2012년 충남대 대학원 전파공학과 졸업(석사). 2012년~현재 부산대 전자전기컴퓨터공학과 박사과정. 2005년~2008년 자동차부품연구원. 2008년~현재 (재)부산테크노파크 특화산업 기술본부 자동차부품기술지원센터 전장사업팀 선임연구원.

박성준(朴星俊)

1987년 1월 30일생. 2012년 경남대 전자공학과 졸업. 2014년 부산대 대학원 전자전기컴퓨터공학과 졸업(석사).

정준형(鄭準衡)

1986년 8월 13일생. 2012년 부산대 전자전기공학부 졸업. 2014년 동 대학원 전자전기컴퓨터공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 박사과정.

김동윤(金瞳潤)

1983년 9월 25일생. 2011년 부산대 전자전기공학부 졸업. 2013년 부산대 대학원 전자전기컴퓨터공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 박사과정.

김장목(金長睦)

1961년 8월 6일생. 1988년 부산대 전기공학과 졸업. 1991년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박) 1997년~2001년 한국전력 전력연구원 선임연구원. 2007년 Flolida state University 방문교수. 2001년 3월~현재 부산대 전기공학과 교수. LG전자 스마트제어 센터장.