

배터리차 추진제어를 위한 병렬 MOSFET의 도통전압을 이용한 전류파형 검출

장성동, 김성중, 정재호, 신희범
경상대학교 전기전자공학부

Reconstruction of Current Waveform for Traction Control of Battery Car using Parallel-connected MOSFET's On-Voltage

Sung-Dong Chang, Sung-Joong Kim, Jae-Ho Chung, and Hwi-Beom Shin
School of Electrical & Electronic Engineering, Gyeongsang National University.

Abstract

In this paper, an algorithm of reconstructing the armature current of the battery car is presented by using MOSFET's on-voltage of the dc chopper and a corresponding circuit is developed with the low-cost analog multiplexer. For driving comfort, the armature current of the motor or the traction force should be properly controlled when the car changes the direction and is accelerated or decelerated and climbs up or down the hill. Therefore, an information of the current is needed for the traction control. The proposed reconstruction algorithm is experimentally verified.

1. 서론

현재 에너지 부족현상, 공해, 환경오염 등과 같은 문제로 인해 전기 자동차는 많은 관심을 받고 있다. 그 중 배터리차는 공항, 공원, 회사 구내, 골프장 등과 같은 한정된 공간에서 제한된 시간에 주로 사용된다. 배터리 차는 용도의 특성상 open car이므로 운행 중 급발진, 급제동의 가감속과 방향 전환시 탑승자가 불안감을 많이 느끼므로 승차감, 안전성이 요구된다. 이런 조건을 갖추기 위해서 배터리차는 추진력 즉, 전기자 전류의 페루프 제어가 필요하다. 가속시 전기자 전류는 수백 암페어의 전류가 흐르므로 전류 검출 방법을 신중히 선택해야 한다.

일반적인 방법으로 비접촉 센서는 전류를 정확히 검출하고 추진 제어기와 대 전류로부터 전기적 절연되어 있어 제어 루프에 적용이 되기 쉽다. 직렬 저항법은 전류 검출하는 저항이 수백 암페어 흐르는 전류

에 견디는 낮은 저항치와 온도 변화에도 정확도를 유지하기 위해 온도 보상회로가 필요하다[1]. 위의 방법들은 간단하고 정확한 반면 대 전류를 검출하기 위해서는 고가의 센서 및 정밀한 저항이 필요하며 설치 공간 문제 등을 갖는 단점을 갖는다.

본 논문에서는 위의 문제를 해결하고자 MOSFET의 도통전압을 이용한 전류 파형을 검출하는 알고리즘을 제시하고, MOSFET의 도통저항 $R_{DS(on)}$, 드레인-소스간 전압 V_{DS} , 드레인전류 I_D , 접합온도 T_J 의 상관관계를 도출한다. 또한, 검출회로를 제작·실험을 통해 제시된 전류 검출 방법의 타당성을 검증한다.

2. MOSFET의 $R_{DS(on)}$ 저항

2.1 도통저항 $R_{DS(on)}$ 계산

MOSFET의 도통전압을 이용하여 전류를 검출하기 위해서 도통저항 $R_{DS(on)}$ 이 필요하다. 드레인-소스간 전압 V_{DS} 와 게이트-소스간 threshold 전압 V_{GS} 에 따라 드레인-소스간 도통저항 $R_{DS(on)}$ 은 다음과 같다[2].

1) $V_{DS} > V_{GS}$ 경우

$$R_{DS(on)} = \frac{V_{DS}}{I_D} = \frac{L^2}{\mu_n C_G} \frac{1}{\left(V_{GS} - \frac{1}{2} V_{DS}\right)} \quad (1)$$

2) $V_{DS} \ll V_{GS}$ 경우, (단, $V_{GS} > 0$)

$$R_{DS(on)} \approx \frac{L^2}{\mu_n C_G} \frac{1}{V_{GS}} \quad (2)$$

여기서,

I_D : 드레인 전류

L : MOSFET cell의 채널의 길이

μ_n : 전자 이동도

C_G : 게이트-채널간 커패시턴스

식(1), (2)는 MOSFET의 L, μ_n, C_G 의 특성을 모두 고려한다면 저항 계산이 복잡해지는 단점이 있다. 하지만 음의 법칙에 의해 도통저항 $R_{DS(on)}$ 는 전압과 전류의 관계식을 표현되므로 전류, 전압 특성그래프에서 구할 수 있다. 그림 1의 전기자 전류제어를 위한 직류초퍼에 사용되는 MOSFET의 특성 그래프에서 $V_{GS}=10[V]$ 인 경우 각 부분의 데이터 값을 얻어 curve fitting을 하면, I_D 와 V_{DS} 의 관계는 다음의 1차 근사식으로 표현된다.

$$I_D = 59.84176 \times V_{DS} + 0.11429 \quad (3)$$

따라서, 상온(25°C)에서의 도통저항 $R_{DS(on)}$ 은 표준저항으로 다음과 같다.

$$R_{DS(on)} \approx 0.01667 [\Omega], (T_J = 25^\circ\text{C}) \quad (4)$$

N 개의 MOSFET을 병렬로 연결한 경우 도통 전체

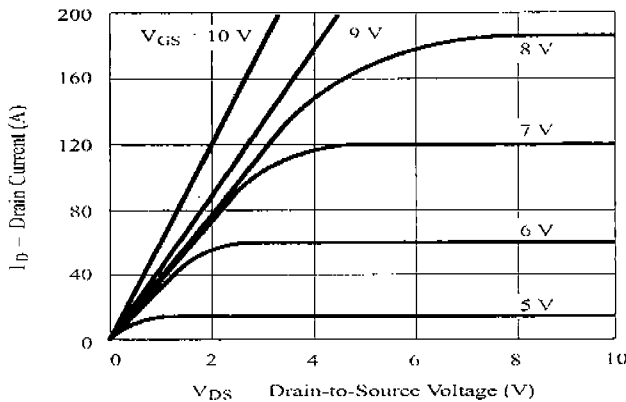


그림 1 SMP60N06-18의 전류, 전압의 특성 그래프
Fig. 1 Drain current vs. drain-to-source Voltage.

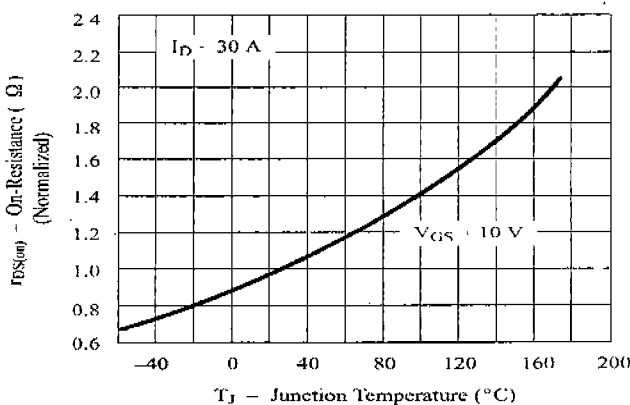


그림 2 SMP60N06-18의 저항, 온도의 특성 그래프
Fig. 2. On-resistance vs. junction temperature.

저항 $R_{DS(on),N}$ 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$R_{DS(on),N} = R_{DS(on)} / N [\Omega] \quad (5)$$

2.2 온도 보상

MOSFET의 구동시 내·외부의 온도에 따라 도통저항 $R_{DS(on)}$ 은 변한다. 그림 2의 도통저항 $R_{DS(on)}$, 접합온도 T_J 특성 곡선에서 보면 접합온도 T_J 가 125°C 까지 상승하면 $R_{DS(on)}$ 은 상온에서 보다 거의 두 배가 된다. 최악의 경우에는 더욱더 심하게 변할 수 있고, 저항 또한 최고치에 도달하게 된다[1]. 이 상태에서 검출된 전류는 실제 전류와 다르기 때문에 보상을 해야 한다. 온도 보상은 방열판에 온도센서를 이용한다.

MOSFET의 온도 보상식은 접합온도 T_J 와 정규화된 저항 $r_{DS(on)}$ 의 특성그래프(그림 2)에서 각 부분의 데이터를 얻어 curve fitting을 통해 다음의 2차 근사식을 구한다.

$$r_{DS(on)} = 1.3405e^{-5} \times T_J^2 + 0.00413 \times T_J + 0.87367 \quad (6)$$

따라서, 식 (6)의 정규화된 저항 $r_{DS(on)}$ 과 상온에서의 표준도통저항(5)을 곱하여 그림 3과 같은 온도에 따른 실제 MOSFET 저항을 구할 수 있다.

3. 전류 검출회로 설계

전동기 제어시, MOSFET은 PWM방식으로 스위칭되기 때문에 V_{DS} 는 PWM 주파수와 동일한 주파수를 가지게 된다. 전류 검출에 필요한 전압을 검출하기 위해서는 도통전압만 검출하는 작업이 필요하다. 그림 4의 PWM파가 Duty가 0.5로 동작한다면 PWM파를 카운터, NOT-gate를 통해 ①,④번 파형을

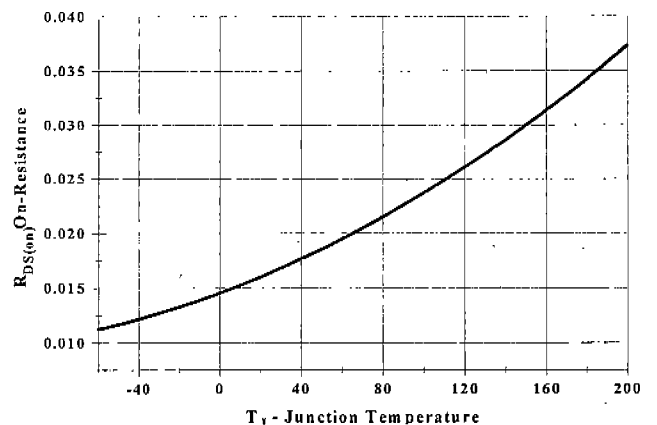


그림 3 온도를 보정한 저항치
Fig. 3 On-resistance with temperature compensation.

만들고, OR, AND, NAND, NOT-gate를 사용해 ②, ③번 파형을 만든다. 그림 4의 ①,②,③,④의 스위칭 파형으로 도통 전압 V_{DS} (⑤), V_{DS} (⑥)을 검출한다.

먼저 V_{DS} (⑤) 검출은 모드(a),(b)에서 이루어지며 ②번이 스위치1을 ON시켜 홀드1에서 전압을 샘플하고 멀티플렉서로 출력한다. 이때 ④번은 스위치22를 ON시켜 홀드2의 전압을 방전시킨다. 스위치1이 ②번에 의해 OFF가 되면 모드(b)로 동작하여, 홀드1의 전압을 멀티플렉서로 출력하고, ④에 의해 스위치22는 계속 ON이므로 홀드2의 전압은 계속 방전된다.

V_{DS} (⑥)의 검출은 모드(c)(d)에서 이루어지며 모드(c)에서 스위치2가 ③번에 의해 ON되면 홀드2에서 전압을 샘플하고 멀티플렉서로 전압을 출력한다. 이때 스위치11이 ①번에 의해 ON되어 모드(a)(b)에서 샘플한 홀드1의 전압을 방전시킨다. 스위치2가 ③번에 의해 OFF되면 모드(d)로 되고 ①번에 의해 스위치11은 ON 상태이므로 홀드1의 전압은 계속 방전되고, 홀드2의 전압을 멀티플렉서로 출력한다.

4. 실험 및 결과

그림 6은 타여자 직류 전동기 구동방식의 배터리 차의 추진제어 블록선도를 나타낸다. 전기자 전류가 대전류이므로 여러 개를 병렬로 연결한 MOSFET을 전기자에 직렬로 연결하여 PWM 방식으로 구동하고, 계자 전류는 H-Bridge 형 컨버터를 PWM 방식으로 구동한다. 제어기는 32비트 MC68307을 사용하였으며 전류 샘플주기는 1[msec]로 하였다. 전기자 측에 MOSFET을 9개로 병렬 연결하였고, 도통전체저항은 식(5)로 구했다. 실험에 사용된 제품의 사양은 표1와 같다.

그림 7과 그림 8은 전기자에 전압을 인가하여 30[A], 60[A]의 전류 응답을 각각 동일한 조건에서 제시한 검출회로와 Hall센서로 검출된 전류 파형을 비교실험 결과이다. 그림 7, 그림 8의 (a)는 검출한 전압 V_{DS} 을 A/D 변환기로 읽어 전류로 계산하여 D/A 변환기로 출력한 것이고 (b)는 Hall 센서로 전기자 전류를 측정하였다. 제시된 방법의 측정된 전류(a)

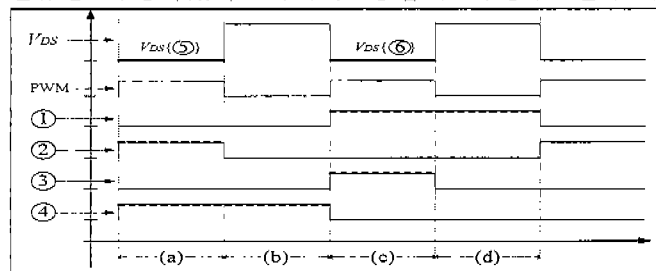


그림 4. 각 부분 스위칭 파형

Fig. 4. Switching waveform of each part.

가 전기자전류(b)와 동일한 전류크기로 검출되었고 파형도 일치함을 보여 주고 있다. 그리고 검출회로 제작에 사용된 소자와 수량은 표2와 같고, 저 가격으로 전류검출회로를 제작할 수 있음을 알 수 있다.

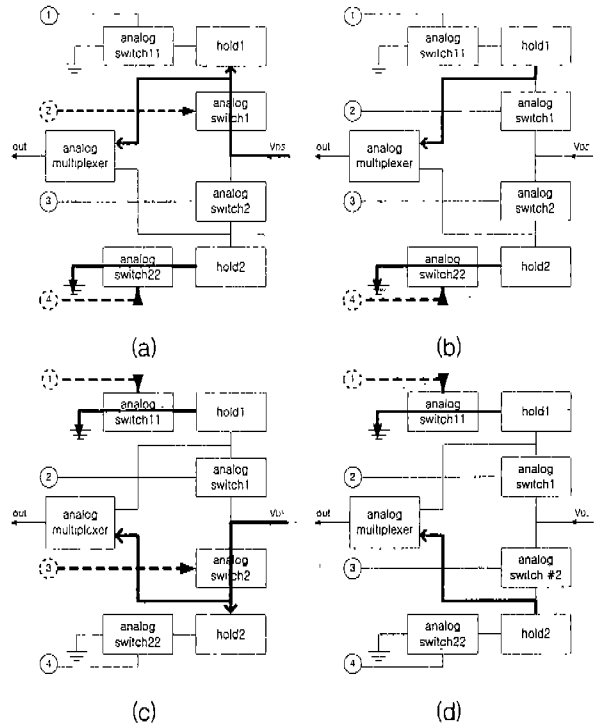


그림 5 전류 파형 검출 회로의 알고리즘

Fig. 5. Algorithm of proposed current sensing circuit.

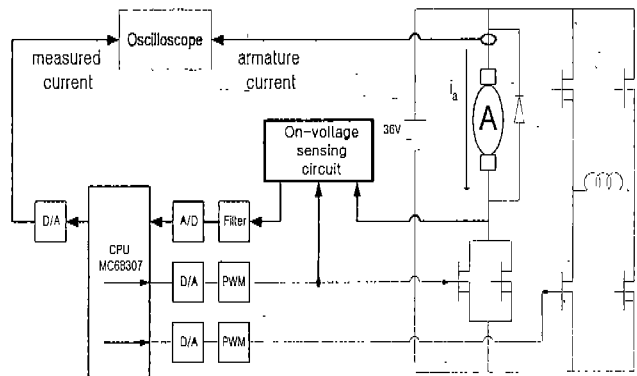


그림 6. 배터리 차의 추진제어 블록선도

Fig. 6. Block diagram of battery car traction control.

표 1. 배터리차 구동 사양

Table 1. Specifications of battery car drive.

모터	3[HP], 2,800[RPM], 타여자 전동기
배터리 전압	36[V]
PWM주파수	15[kHz]
MOSFET	SMP60N06-18

표 2. 검출회로 부품

Table 2. The elements of sensing circuit.

소자명	수량	소자명	수량	소자명	수량
7404	1	4066	1	R	13
7408	1	74393	1	C	6
7414	1	2902	1	Diode	3

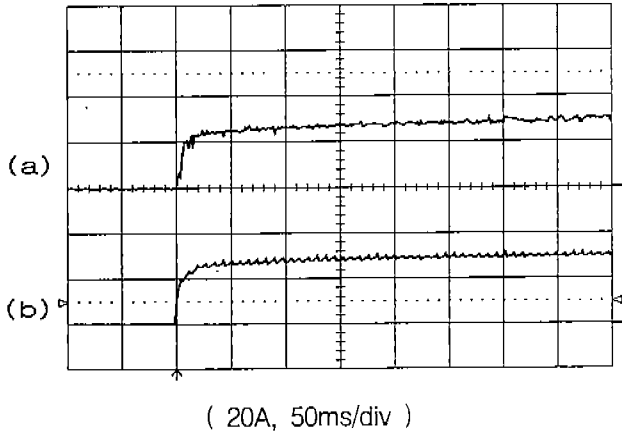


그림 7. 전기자 전류, 30A; (a) 제안한 회로, (b) Hall 센서

Fig. 7. Armature current, 30A; (a) proposed, (b) Hall sensor.

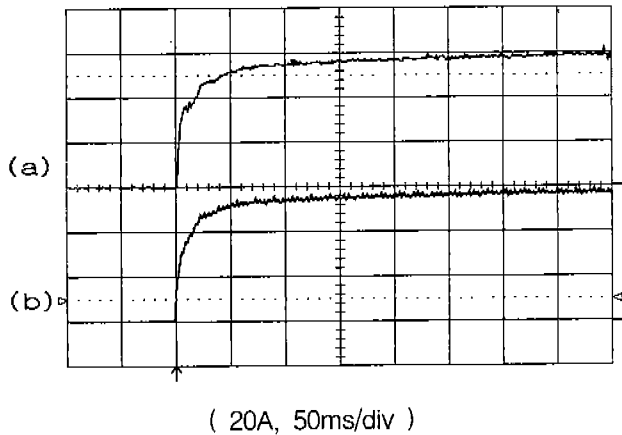


그림 8. 전기자 전류, 60A; (a) 제안한 회로, (b) Hall 센서

Fig. 8. Armature current, 60A; (a) proposed, (b) Hall sensor.

4. 결론

본 연구는 병렬로 연결된 MOSFET의 도통전압을 이용한 전류 검출방법을 제안하여 그 알고리즘과 $V_{DS}, I_D, R_{DS(on)}$ 의 관계식·도통저항의 온도 보상식을 제시하였고 전류 파형 검출 회로를 제작, 전류 검출 실험을 통하여 그 타당성이 검증되었다. 제시한 검출회로는 대전류도 우수하게 검출할 수 있고, 저가격으로 제작이 가능하므로 경제성을 중시하는 산업 응용 분야에서 직접 사용 가능하다.

참고문헌

- [1] R. Valentine, *MOTOR CONTROL ELECTRONICS HANDBOOK*, McGraw-Hill, pp. 162-187, 1998.
- [2] D. Grant, "Using HEXFET III in PWM inverter for motor drives and UPS systems," in *HEXFET MOSFET Designer's Manual*, International Rectifier Corporation, El Segundo, CA, vol. 1, pp. 1991-205, 1993.
- [3] J. W. Kolar, H. Ertl, and F. C. Zach, "How to include the dependency of the $R_{DS(on)}$ of power MOSFET's on the instantaneous value of the drain current into the calculation of the conduction losses of high-frequency three-phase PWM inverters," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 45, no. 3, pp. 369-375, June 1998.
- [4] "SMP60N06-18", TEMIC semiconductors, Data sheet, May 1994.