

MOSFET을 이용한 전동기 구동을 위한 저가격형 전류검출법

張成東*, 鄭宰虎, 朴鍾圭, 李均淨, 慎輝範

A Low-Cost Current-Sensing Scheme for MOSFET Motor Drives

Sung-Dong Chang, Jae-Ho Chung, Jong-Gyu Park, Kyun-Jung Lee, and Hwi-Beom Shin

요 약

전동기 구동에서 전류제어와 보호를 위해 전류 센서를 사용한다. 그러나 이런 전류 센서들은 크기와 비용측면에서 단점을 가지고 있다. 제안하는 전류 검출법은 MOSFET의 도통전압과 도통저항을 이용한다. 도통전압을 검출하는 아날로그 회로는 부피가 작고 저가로 제작 가능하므로 제시한 단점을 해결하고, 도통저항을 계산하기 위한 퍼지 추론은 MOSFET의 특성 그래프를 기초로 간단하게 설계된다. 제안한 전류 검출법으로 제작된 전류 검출기를 이용하여 배터리차의 전류 제어 실험을 통해 제안한 전류 검출법의 타당성을 검증한다.

ABSTRACT

A low-cost current-sensing scheme for the motor drives with MOSFET is described. Many motor drives usually employ the common current sensors to measure current for the purpose of control or protection. These current sensors, however, significantly burden the power circuit with the size and cost. The proposed current-sensing scheme utilizes information concerning MOSFET's On-voltage and On-resistance. An analogue circuit detecting On-voltage can overcome the above disadvantages because the circuit is small and is made at a low cost, and the fuzzy inference for On-resistance is also simply designed based on MOSFET's characteristics. The validity of this scheme will be experimentally verified by adopting the current control of a battery car.

Key Words : Current-Sensing scheme, MOSFET's On-resistance, Battery car

1. 서 론

PWM(Pulse Width Modulation)을 이용한 교류·직류전동기 제어, 전력변환 컨버터, 인버터 등은 전류 제어, 대 전류 보호를 위해 부하 전류 측정 등이 필요하

다. 또한, 이런 전류는 반도체 전력 스위치를 통해 흐르므로 반도체 전력 스위치에서 전류를 검출할 수 있다. 일반적으로, 직류전류를 측정하기 위해 분류기(shunt resistor), Hall-effect 전류센서 등이 사용된다. 분류기는 대 전류에서 저 전력손실을 갖는 낮은 저항과 온도보상회로, 전기절연회로가 필요하고, Hall-effect 전류센서는 대 전류검출과 전기절연이 우수하나 설치공간의 부족과 대 전류를 검출하기 위해 고가의 센서가 필요해 추가적인 비용의 문제를 가지고 있어 전력전자 응용분야에서 사이즈, 무게, 가격 등의 경쟁력에 현저한 영향을 준다^{[1][4]}.

*경상대 대학원 전기공학과 박사과정 수료

E-mail : s_niar@gshp.gsnu.ac.kr

접수일자 : 2002. 8.22

1차심사요청일 : 2002. 8.28 2차심사요청일 : 2002.10. 1

심사완료일 : 2002.11. 1

본 논문에서는 제안하는 전류 검출법은 MOSFET의 도통전압(On-voltage)과 도통저항(On-resistance)의 옴의 법칙을 이용하는 방법이다. 여기서 도통전압, 저항은 MOSFET이 도통될 때 MOSFET의 드레인-소스 양단 전압·저항을 말하며, 제안하는 전류 검출법을 위해 도통전압의 검출과 도통저항의 추정이 필요하다. 그러나 도통저항이 일정할 경우 도통전압은 전류와 동일한 파형이므로 도통전압의 검출이 필요하지만 MOSFET이 PWM으로 구동되어 드레인-소스 양단 전압에 PWM주파수가 나타나므로 드레인-소스 전압에서 도통전압만을 검출하는 특별한 회로가 필요하다. 그래서 본 논문에서는 이를 위해 전압 검출회로를 소개한다. 또한 MOSFET의 도통저항을 추정하기 위해 도통저항의 모델이 필요하다. 그러나 MOSFET 모델에 대한 연구는 채널의 길이, 전자 이동도, 게이트 채널간 커패시턴스에 대한 도통저항^[5], 온도와 도통저항의 관계 모델^[6], 저온에서의 MOSFET 모델^[7], MOSFET의 열저항 모델^[8]이 이루어졌으나 이런 모델들은 도통저항의 계산뿐만 아니라 필요한 파라미터를 측정하기도 어렵다. 그런데 MOSFET의 도통저항은 MOSFET의 드레인 전류, 게이트-소스 전압, 접합온도에 의해 변하므로 MOSFET의 특성 곡선으로 도통저항을 계산할 수 있다. 그래서 본 논문에서는 MOSFET의 특성 곡선으로부터 퍼지테이블을 구성하여 퍼지추론으로 드레인 전류에 대해서 변하는 도통저항을 추론한다.

본 논문에서는 MOSFET을 이용한 전동기 구동을 위한 저가격형 전류 검출법을 제안하고, 저가격 아날로그 소자로 이루어진 전압 검출회로를 소형으로 제작하여 위에서 언급한 전류센서의 문제점들을 해결한다. 마지막으로, 직류전동기 구동형 배터리 차의 전류제어 실험을 통해 Hall effect 전류센서와 비교·분석함으로써 제안한 전류 검출법의 타당성을 검증한다.

2. 전류검출 방법

그림 1은 직류초퍼로 구동되는 배터리차 추진시스템을 나타낸다. 일정한 크기의 배터리전압으로부터 전동기전류를 제어하기 위해 직류초퍼는 PWM방식으로 구동되고, 가격 및 스위칭소음을 줄이기 위해 MOSFET을 병렬로 연결하여 사용한다. MOSFET은 트랜지스터, IGBT 등의 전력스위치와는 달리 도통시 드레인-소스간에 저항특성을 지니므로 도통저항 $r_{DS(on)}$ 과 도통전압 $v_{DS(on)}$ 을 안다면 다음 식을 이용하여 도통전

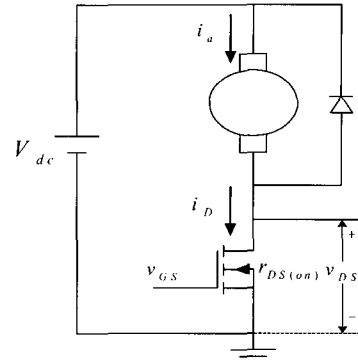


그림 1 배터리차 추진시스템
Fig. 1 Traction system of battery car

류 i_D 를 구할 수 있다.

$$i_D = \frac{v_{DS(on)}}{r_{DS(on)}} \quad (1)$$

즉, MOSFET이 켜져있을 때 전동기전류는 도통전류와 같아 도통전압으로부터 얻을 수 있으나 꺼져있을 때는 MOSFET 양단전압으로부터 전동기전류를 얻을 수 없다. 따라서, PWM신호의 on/off 동작에 따른 올바른 MOSFET의 도통전압을 검출할 수 있는 회로와 온도, 전류 등 동작 조건에 따라 도통저항을 얻는 알고리즘이 필요하다.

2.1 도통전압 검출회로설계

MOSFET의 도통전압은 PWM신호의 on/off 동작에 따라 그림 2에서와 같이 간헐적으로 나타난다. 추진력 제어를 수행하는 마이크로프로세서에서 PWM신호가 on인 동안에 MOSFET 양단전압을 샘플링하면 이 전압은 MOSFET의 도통전압으로 올바른 정보이지만 PWM신호가 off인 동안 또는 스위칭과도기간에 전압을 샘플링하면 잘못된 정보를 이용하게되어 추진력제어에 문제를 발생시킨다. 따라서 그림 2에서와 같이 PWM신호가 off기간에도 on기간에 얻은 정보를 계속 유지시켜 올바른 샘플링이 이루어지도록 저렴한 가격의 아날로그 스위치와 아날로그 멀티플렉서를 이용하여 그림 3과 같은 도통전압 검출회로를 설계한다.

그림 3은 MOSFET의 on/off 동작에 따른 도통전압 검출회로의 동작을 보여준다. 그림 2와 같이 도통전압을 연속으로 출력하는 방법은 간단하다. MOSFET이 on인 경우 아날로그 스위치S2를 켜서 도통전압을 커패시터C_A에 충전시키고, off인 경우 아날로그 스위치S2를 꺼서 배터리전압의 충전을 차단한다.

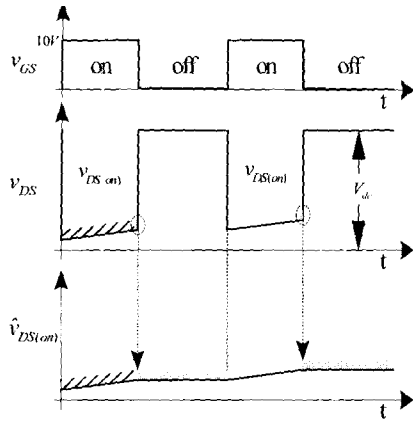


그림 2 게이트-소스 신호에 따른 도통전압 검출 타이밍
Fig. 2 Timing diagram for detecting On-voltage dependent on gate-source signal

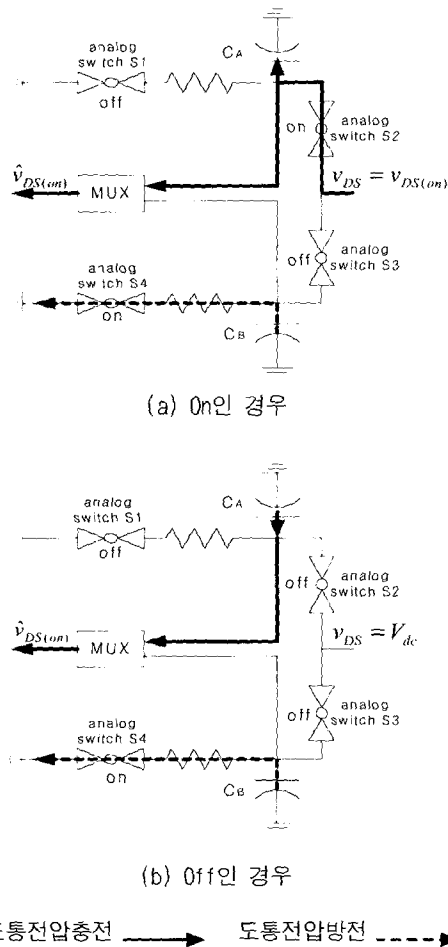


그림 3 한 주기 동안 전압 검출 회로의 동작
Fig. 3 Operation of the voltage-detecting circuit during a sampling time

즉, on 동안 도통전압은 그대로 출력되고 off 동안 최종 충전된 도통전압이 출력된다. 그런데 다음 주기에 올바른 도통전압을 얻기 위해 C_A 의 도통전압은 꼭 방전되어야 하나 한 주기동안 C_A 를 사용하지므로 방전이 불가능하다. 그래서 커패시터 C_B 를 추가하여 다음 주기에 충전용으로 사용한다. 그림 3에서 C_B 는 다음 주기에 충전용으로 사용하기 위해 계속 방전된다. 즉, 한 주기동안 두 개의 커패시터 중 하나는 충전용이고 다른 하나는 방전용으로 사용된다.

전압검출회로의 출력전압과 전기자전류의 파형은 MOSFET이 on인 경우 같고, off인 경우 다르다. 그러나 전체적인 전압파형은 실제 전기자 전류 파형과 거의 유사할 것으로 기대된다.

2.2 도통저항의 퍼지추론

그림 4는 일정한 온도에서의 MOSFET의 특성곡선을 보여준다. 특성곡선은 게이트-소스전압에 따른 드레인-소스전압에 대한 드레인전류의 곡선이며 도통저항의 특성을 나타낸다. 어느 일정한 게이트-소스전압에서 MOSFET은 저항영역에서 동작하여 드레인전류가 커질수록 드레인-소스전압은 선형적으로 증가하므로 도통저항은 일정한 상수가 된다. 따라서 동작온도가 일정하면 도통전압만 검출하여 도통저항인 전기자전류를 얻을 수 있다. 그러나 동작온도가 변하면 드레인전류와 드레인-소스전압의 관계는 즉, 도통저항은 비선형 특성을 가진다.

게이트-소스전압이 일정하고 동작온도가 변할 때 도통저항의 특성을 그림 5에서 보여준다. 그림 5로부터 낮은 온도와 작은 전류에 대해서는 도통저항은 선형적으로 증가하고, 높은 온도와 큰 전류에서는 도통저항은 비선형적으로 증가하는 것을 알 수 있다. 따라서 비선형 문제에 적합한 퍼지추론을 이용하여 MOSFET의 동작온도와 드레인전류에 대한 도통저항을 추론한다.

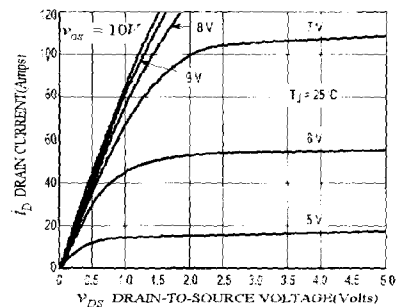


그림 4 MOSFET의 특성 곡선
Fig. 4 MOSFET's characteristic graph

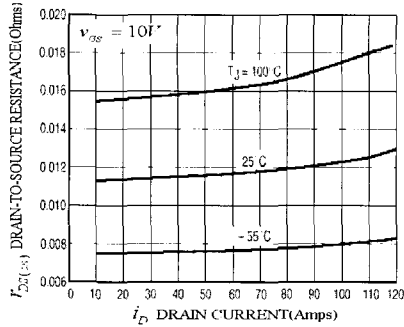


그림 5 동작온도와 드레인 전류에 대한 도통저항 특성
 Fig. 5 Characteristics of On-resistance dependent on junction temperature and drain current

퍼지시스템으로 도통저항을 추론하기 위해 동작온도와 드레인전류를 알아야 하는데 접합온도를 직접 측정하기 어려우므로 접합온도와 비례관계를 가지는 방열판온도를 이용하고, 드레인전류를 대신하여 추정전류를 궤환하여 사용한다. 그래서 퍼지시스템의 두 입력은 방열판온도와 추정전류, 출력은 도통저항이다. 일반적으로 퍼지시스템은 전문가 지식에 의해 멤버쉽함수, 퍼지테이블과 퍼지규칙을 결정하지만, 도통저항을 위한 퍼지시스템은 MOSFET의 특성곡선을 바탕으로 구성된다.

그림 6은 도통저항 추론을 위한 퍼지시스템을 보여주고, 그림 7은 퍼지시스템에서 사용하는 멤버쉽함수를 보여준다. 온도의 멤버쉽함수는 최소·최대 온도와 상온을 기준으로, 전류의 멤버쉽함수는 최대 전류와 정격전류를 기준으로 MOSFET 특성곡선으로부터 각각 설계된다. data sheet는 MOSFET 한 개에 대한 특성곡선을 제공하므로 data sheet의 드레인전류가 최대 전기자전류보다 작을 때 멤버쉽함수를 설계하는데 어려움이 있다. 하지만 직류초퍼에 n 개의 MOSFET을 병렬로 연결하므로 MOSFET 한 개에 흐르는 전류는 전체 전류의 $1/n$ 이 된다. 그래서 한 개의 data sheet로부터 최대 전류범위를 가지는 멤버쉽함수를 설계할 수 있다. 각 멤버쉽함수는 이등변 삼각형으로 구성되고, 출력 멤버쉽함수는 퍼지테이블에 포함된다.

표 1에서 퍼지시스템의 퍼지테이블을 보여준다. 퍼지테이블은 멤버쉽함수와 MOSFET의 동작온도와 드레인전류에 대한 도통저항의 특성곡선으로부터 설계된다. 퍼지테이블에서 보여주는 값은 도통저항이다. 퍼지시스템에서 두뇌 역할을 하는 퍼지규칙은 멤버쉽함수와 MOSFET의 특성 곡선으로부터 설계되고, 일반화하면 식 (2)가 된다.

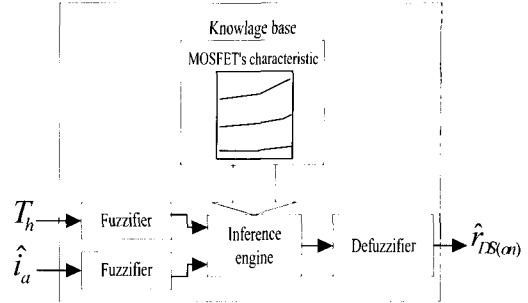


그림 6 도통저항 추론을 위한 퍼지시스템
 Fig. 6 Fuzzy inference of On-resistance

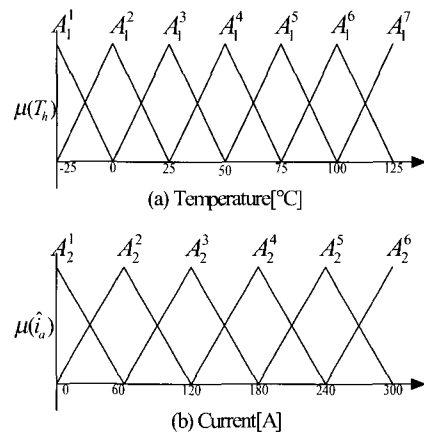


그림 7 T_h 와 i_a 의 멤버쉽 함수
 Fig. 7 Membership function of T_h and i_a

표 1 퍼지 테이블
 Table 1 Fuzzy table

$y \ i_i$	A_2^1	A_2^2	A_2^3	A_2^4	A_2^5	A_2^6
A_1^1	0.1261225	0.0893116	0.0820702	0.07633731	0.07000101	0.06396645
A_1^2	0.1321571	0.0923289	0.0850874	0.07935460	0.07301830	0.06698373
A_1^3	0.1381917	0.0983635	0.0911220	0.08538917	0.07905287	0.07603559
A_1^4	0.1442262	0.1045489	0.0991178	0.09278152	0.08508744	0.08207016
A_1^5	0.1502608	0.1105835	0.1051524	0.09881609	0.09112201	0.08810473
A_1^6	0.1562954	0.1166181	0.1111870	0.10485066	0.09715658	0.09413930
A_1^7	0.1593127	0.1226526	0.1172215	0.11088523	0.10319115	0.09715658

퍼지추론에 필요한 퍼지함수는 곱의 추론엔진 (product inference engine), 단일 퍼지화 (singleton fuzzifier), 평균중간 비퍼지화 (center average defuzzifier)로 구성되며 식 (3)이다⁹⁾.

$Ru^{i_1 i_2}$: IF T_h is $A_1^{i_1}$ and \tilde{i}_a is $A_2^{i_2}$
 THEN $r_{DS(on)}$ is $\bar{y}^{i_1 i_2}$ (2)

$$\hat{r}_{DS(on)} = \frac{\sum_{i_1=1}^7 \sum_{i_2=1}^6 \bar{y}^{i_1 i_2} (\mu_{A_1^{i_1}}(T_h) \mu_{A_2^{i_2}}(\tilde{i}_a))}{\sum_{i_1=1}^7 \sum_{i_2=1}^6 \mu_{A_1^{i_1}}(T_h) \mu_{A_2^{i_2}}(\tilde{i}_a)} \quad (3)$$

여기서, $i_1 = 1, 2, \dots, 7$, $i_2 = 1, 2, \dots, 6$ 이고, $\bar{y}^{i_1 i_2}$ 는 출력 멤버쉽함수이고, μ_A 는 입력 멤버쉽함수이다.

3. 실험 및 결과 고찰

그림 8은 제안한 전류검출법의 타당성을 검증하기 위한 직류전동기의 전기자 전류 제어실험을 위한 블록도이며 16비트 MC68HC912BC32 마이크로프로세서를 사용하여 퍼지추론과 적분·비례 제어를 구현하였다. 그리고 PWM 주파수는 16kHz이다. 병렬 연결된 10개의 MOSFET이 전기자와 직렬로 연결되어 있고, 계자는 4개의 MOSFET이 H-bridge 형으로 구성되어 있는데 그림 8에서 계자측의 구성은 생략되었다. 그리고 제안된 전압검출회로는 표 2에 제시된 저가격의 아날로그 소자와 디지털 소자를 사용하여 설계되었다. 안정시간을 15msec, 계동계수를 1, 제어주기를 0.5msec가 되도록 설정하여 제어기의 이득을 계산하였다. 표 3에서 실험에서 사용된 사양들을 보여준다.

제안한 방법의 타당성을 위해 동일한 전류제어기를 적용시켜 LEM사의 LT300-S Hall-effect 전류센서와 제안한 전류검출법으로 방열판 온도가 25°C, 40°C, 60

표 2 전압검출회로의 부품

Table 2 The parts of the proposed circuit

부 품	수 량	부 품	수 량	부 품	수 량
7404	1	4066	1	저항	13
7408	1	74393	1	커패시터	6
7414	1	2902	1	다이오드	3

표 3 실험 사양

Table 3 Experimental specifications

전동기	3hp, 2800rpm 타여자 직류 전동기
배터리전압	36V
PWM 주파수	16kHz
MOSFET	60A,60V,MTP60N06HD 10개 병렬
μ-processor	16bit MC68HC912
Hall-effect 전류센서	LEM사 LT300-S

°C, 80°C일 때 전기자전류 명령 0.5pu, 1.0pu, 1.5pu에 대한 각각의 전기자전류 제어결과를 그림 9에서 보여 준다. 각 그림에서 전류파형은 마이크로프로세서 내부의 전류값이며 굵은 선과 점선은 각각 제안한 전류 검출법과 Hall-effect 전류센서에 의한 실험 파형이고 실선은 전류명령이고, 1pu는 61A이다.

그림 9의 실험 결과를 보면, 제안한 전류검출법과 Hall-effect 전류 센서로 검출한 실험 결과가 비슷하고, 특히 과도현상 부분은 Hall-effect 전류 센서의 파형과 거의 일치한다. 이는 제안한 전압검출회로는 전류파형을 정확히 검출하고 있고 퍼지시스템은 방열판온도와

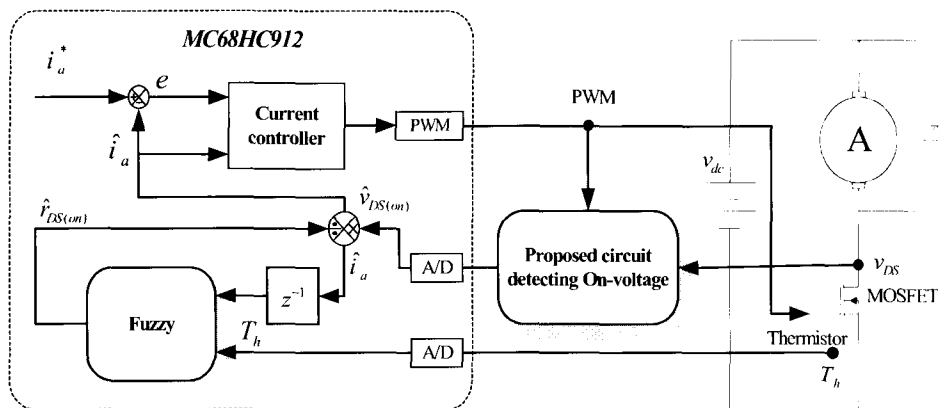


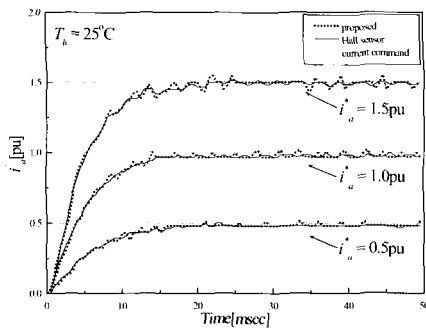
그림 8 전류 제어 블록도

Fig. 8 Block diagram of current control

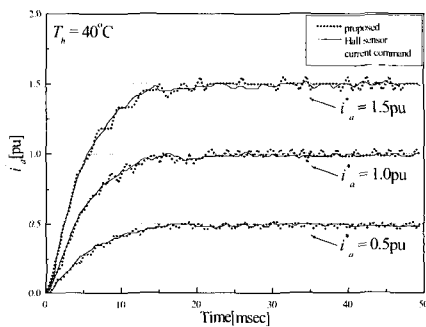
제한전류를 퍼지추론을 통해 도통저항을 잘 추론하고 있음을 의미한다. 그러나 제안한 전류검출법의 실험 파형은 과도상태에서 리플을 적게 포함하고 있지만 정상상태에서는 다소 많이 포함하고 있다. 이는 제안한 전압검출회로가 실험실에서 제작된 시작품의 결과이므로 PCB설계를 통해 제안한 전압검출회로와 퍼지추론의 최적화 과정을 거친다면 보다 우수한 결과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

결과적으로, 제안한 전류검출법은 전압검출회로를 MOSFET에 병렬로 연결하므로 유사한 분야에 회로 변경 없이 사용될 수 있는 장점이 있지만 퍼지추론을 위해 사용되는 MOSFET의 데이터를 얻어야 하는 단점이 있다. 그러나 제안한 전압검출회로가 직류전동기 전전자 전류파형을 유사하게 검출하고 제안한 퍼지시스템이 온도와 전류 변화에 대해 도통저항을 추론함을 알 수 있다. 그리고 대용량 상용 전류센서를 단품용 기준으로, 제안한 전류검출법은 표 2를 기준으로 가격과 크기를 조사하여 표 4에서 비교하였다. 제안한 전류검출법은 시작품임에도 불구하고 다른 센서들에 비해서 소형이고 저 가격이다.

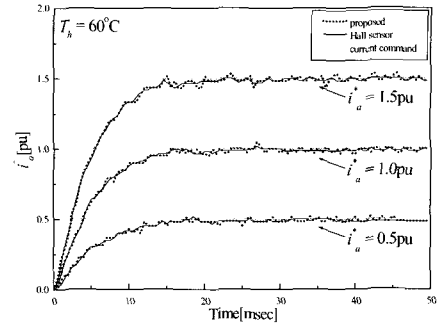
즉, MOSFET의 도통저항을 이용한 전류 검출법의 타당성을 보여준다.



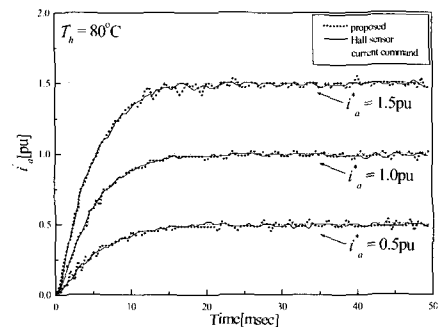
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 9 실험 결과: 제안한 방법과 Hall-effect 전류센서
(a) $T_h = 25^\circ\text{C}$, (b) $T_h = 40^\circ\text{C}$,
(c) $T_h = 60^\circ\text{C}$, (d) $T_h = 80^\circ\text{C}$

Fig. 9 Experimental results: the proposed and Hall-effect sensor
(a) $T_h = 25^\circ\text{C}$, (b) $T_h = 40^\circ\text{C}$,
(c) $T_h = 60^\circ\text{C}$, (d) $T_h = 80^\circ\text{C}$

표 4 세 가지 센서의 가격과 크기 비교

Table 4 Comparison between the three sensors in the size and price

종 류	크기(부피)	가 격
Hall-effect 전류센서	100×50×55mm	수~십수만원
분류기	100×10×10mm	수만원
제안한 전류검출법	90×50mm(시작품)	약 3천원

4. 결 론

본 논문에서는 MOSFET을 이용한 전동기 구동을 위한 저가격형 전류 검출법을 제안하였고, 타당성을 검증하기 위해 전류제어 실험을 행하였다. 실험을 통하여 제안한 도통전압 검출회로와 도통저항을 위한 퍼

지추론의 타당성을 확인하였고, 제안한 전류검출법의 효율성을 검증하였다. 그리고 제안된 전압검출회로는 저가격의 아날로그 소자로 구성되므로 가격을 중요시하는 분야와 MOSFET을 이용한 응용분야에 적용 가능하리라 사료된다. 향후, 전류검출의 정밀도를 높이고, MOSFET에 고장이 발생했을 경우 이를 진단할 수 있는 알고리즘에 대한 연구가 필요하고 수행할 계획이다.

일 램 표

- i_a : 직류전동기의 전기자전류
- \hat{i}_a : 추정 전기자전류
- i_a^* : 전기자전류 명령
- i_D : MOSFET 도통전류
- $r_{DS(on)}$: MOSFET 도통저항
- $\hat{r}_{DS(on)}$: 추정 MOSFET 도통저항
- $v_{DS(on)}$: MOSFET 도통전압
- v_{DS} : MOSFET 드레인-소스전압
- $\hat{v}_{DS(on)}$: 전압검출회로 출력전압
- V_{dc} : 배터리전압
- T_j : 접합온도
- T_h : 방열판온도

본 연구는 한국과학재단의 산학협력연구지원 (1999-30200-001-2) 으로 수행되었음.

참 고 문 헌

[1] J.T. Boys, "Novel current sensor for PWM AC drive", IEE PROCEEDINGS, Vol. 135, Pt. B, No. 1, pp. 27 ~32, 1988.

[2] Arthur Radun, "An alternative low-cost current-sensing scheme for high-current power electronics circuit", IEEE Trans. Industry Electronics, Vol. 42, No. 1, pp.78~84, 1995.

[3] Albert J. Williams 3rd, "Current Measurement Technology Development Progress in the '90s - A Review", OCEANS '96(IEEE), Vol. 1, pp. 105~109, 1996.

[4] R. Valentine, *Motor Control Electronics handbook*,

McGraw-Hill, pp. 162~187, 1998.

[5] J.W. Kolar, H. Ertl, and F.C. Zach, "How to Include the Dependency of the $R_{DS(on)}$ of Power MOSFET's the Instantaneous Value of the Drain Current into the Calculation of the Conduction Losses of High-Frequency Three-Phase PWM Inverters", IEEE Trans. Industry Electronics, Vol. 45, No. 3, pp. 369~375, 1998.

[6] V. Sunde, Z. Bencic and Z. Jakopovic, "A temperature-dependent electrothermal MOSFET model for calculating its current loadability", ISIE '99, Vol. 2, pp. 579~583, 1999.

[7] W. Lu, R.J. Mauriello, K.B. Sundaram, and L.C. Chow, "A study of on-resistance and switching characteristics of the power MOSFET under cryogenic conditions", INT. J. Electronics, Vol. 87, No. 1, pp. 99~106, 2000.

[8] Kandarp I. Pandya and Wharton McDaniel, "A Simplified method of generating thermal models for Power MOSFETs", 18th IEEE SEMI-THERM Symposium, pp. 83~87, 2002.

[9] Li-Xin Wang, *A Course in Fuzzy Systems and Control*, Prentice-Hall, 1997.

[10] Gary L. Skibinski and William A. Sethares, "Thermal parameter estimation using recursive identification", IEEE Trans. Power Electronics. Vol. 6, No. 2, pp. 228~239, 1991.

[11] R. Severns and J. Armijos, *MOSPOWER applications handbook*, Siliconix, pp. 4-1~4-21, 1984.

[12] 임영철, 김광현, 장영학, 나석환, 위석오, 양형렬, "퍼지 제어를 이용한 전기자동차 구동용 유도전동기의 속도 제어", 전력전자학회지, 제3권 제2호, pp. 138~147, 1998.

[13] "MTP60N06HD", *Motorola, Designer's Data Sheet*, 1995.

저 자 소 개



장성동(張成東)

1975년 1월 28일생. 1997년 경상대 전기공학과 졸업. 2000년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2002년 동 대학원 전기공학과 박사과정 수료.



정재호(鄭宰虎)

1966년 8월 18일생. 1992년 경상대 전기공학과 졸업. 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2000년 동 대학원 전기공학과 박사과정 수료.



이균정(李均淨)

1973년 12월 20일생. 1999년 경상대 전기공학과 졸업. 2002년 동 대학원 전기공학과 석사과정 수료.



박종규(朴鍾圭)

1969년 12월 24일생. 1995년 경상대 전기공학과 졸업. 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1999년 동 대학원 전기공학과 박사과정 수료.



신휘범(慎輝範)

1982년 서울대 전기공학과 졸업. 1985년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 대학원 졸업(석사). 1992년 동 대학원 전기 및 전자공학과 졸업(박사). 1990~1993년 현대전자(주) 선임연구원. 2000년~2002년 미국 University of Wisconsin-Madison 방문교수. 1993년~현재 경상대학교 전기전자공학부 부교수. 경상대학교 공학연구원 연구원. 당 학회 조사이사.