

전기자동차용 전력변환시스템의 스위치 개방형 고장 검출

박태식[†]

Switch Open Circuit Fault Detection for Power Conversion System of Hybrid Electric Vehicles

Tae-Sik Park[†]

Abstract - Recently, the demand for fuel efficient electric vehicles (EVs) and hybrid electric vehicles (HEVs) has been growing globally. Due to the increased number of switching devices in the electrified vehicles, the probability of the semiconductor device failure is much higher than in other application areas. A sudden failure in one of the power switches and insufficient power management ability in the systems not only decreases system performance, but also leads to critical safety problems. In this paper, novel switch open circuit fault detection method is proposed, and the proposed approach is verified by experiments.

Keywords: hybrid electric vehicle, power conversion system, boost converter, switch open circuit, fault, diagnostic

1. 서 론

환경친화적인 EV와 HEV에 대한 수요의 급격한 증가는 전세계 파워 트레인 분야에서 새로운 파라다임으로 자리잡고 있으며, 고신뢰성 및 고효율의 전력 변환 시스템에 대한 새로운 기술을 요구하고 있다. EV와 HEV는 구동용 전동기, 승압 컨버터, 배터리 또는 울트라 캐패시터의 충방전을 위한 양방향 컨버터, AC/DC PWM 컨버터 그리고 전동기 구동을 위한 DC/AC 인버터, 각종 센서류를 필수적인 구성요소로 하고 있고, 이러한 전기자동차 시스템의 주요 구성으로서의 전력 변환장치는 다수의 고전력 반도체 스위치 및 수동/능동 소자를 포함하고 있어 스위치 및 소자의 고장으로 인한 잠재적인 위험 요소를 다량 포함하고 있다.^[1]

구동용 전동기의 고장은 권선의 일부에 단락이 발생하거나 절연파괴가 발생하는 경우로서 인접 코일 또는 코어로의 고장의 전이를 막기위하여 온라인으로 고장이 검출되어야 하며 특히 고정자 권선의 부분적 단락으로 인한 고장에 대한 연구가 지속적으로 수행되어 왔다.^[1]

인버터 및 전력 변환 장치의 고장은 AC/DC 정류기의 고장, 캐패시터의 열화와 파괴 및 스위칭 소자의 고

장 등을 포함하고 있고, 이중 게이트 드라이브의 문제 또는 주위 소자의 파괴로 인해 스위칭 도통이 실패하는 개방형 고장이 주로 발생하고 있다. 또한 과전류에 의한 소자 파괴와 단락은 일반적으로 퓨즈의 용해로 방지할 수 있으며 결과적으로 개방형 고장이 발생하게 된다. EV와 HEV의 경우 스위치의 개방형 고장은 울터네이터로부터 발전되는 전압의 정류실패, 울트라 캐패시터 및 배터리의 충방전 실패, 인버터의 전동기 구동을 위한 전압 출력 실패 및 토크 리플 발생의 원인이 될 수 있다.^{[2]-[10]} 특히 차량용 전력 변환 장치는 계절적, 기후적 온도 및 환경 그리고 운전 상태의 급격한 변동에 취약하게 노출되어 있어 상대적으로 높은 고장 확률을 가지고 있으며, 전동기를 주 구동수단으로 사용하고 있는 전기 자동차에 있어서 전력변환 장치의 고장은 치명적인 사고 및 손실의 원인이 될 수 있다.

그림 1은 HEV의 전형적인 전력 변환 시스템을 보여 주고 있다. 스위칭 소자 및 컨버터의 기능 그리고 간략한 설명을 위해 절연 변압기의 구성은 생략하였다. 그림 1에서와 같이 전체 16개 이상의 고전력 스위칭 소자가 사용되고 있고 가능한 고장 위치를 표시하고 있다. DC/AC 인버터와 AC/DC 컨버터의 고장진단은 많은 연구 개발자에 의해 수행되어 다양한 고장 검출 및 진단 그리고 보상방법이 제안되어 왔다. 그러나 대부분의 연구가 적응제어, 학습이론, 퍼지이론과 같은 고급 제어 이론을 사용하고 있고, 이러한 방식들은 모델링을 통해

Paper number: TKPE-2013-18-2-12 ISSN: 1229-2214

[†] Corresponding author: points33@naver.com, KIPO

Tel: +82-42-481-8496 Fax: +82-42-472-3517

Manuscript received Jan. 16, 2013; accepted Feb. 19, 2013

도출된 정상 모델을 기준 모델로 하고 현재 시스템의 상태로부터 적응 모델 또는 학습 모델의 출력을 추출하고 이를 정상모델과 비교하여 고장을 진단하는 방식으로 실제 구현이 복잡해 지거나, 별도의 전류 또는 전압 센서를 사용하고 있어 비용과 구성 측면에서 실용성에 한계가 있다.^{[11]-[13]}

따라서, 본 논문에서는 EV 또는 HEV에서 발생할 수 있는 전동기 고장, 전력 변환 장치의 고장, 각종 소자 및 센서류의 고장 중에서 전압 변환 장치의 스위치 개방형 고장 발생을 검출할 수 있는 방법을 제안하고자 한다. 제안된 스위치 개방형 고장 검출 방식은 별도의 복잡한 연산과정 및 신호처리의 도입이 필요없이 기존의 EV 및 HEV 시스템에 포함되어 있는 전류 센서만을 사용하는 방식으로 구조가 간단하고 고성능의 고장 검출 성능과 더불어 저비용의 구현이 가능한 점이 특징이다. 제안된 스위치 개방형 고장 검출 방식은 Texas Instrument사의 TPMS320F2812 DSP와 BLDC 전동기 구동 시스템으로 구성된 실험세트를 통해 타당성을 검증하였다.

2. EV 및 HEV 시스템에서 스위치 개방형 고장

EV 및 HEV 시스템에서 스위치의 개방형 고장은 전체 시스템에 포함되어 있는 다수의 컨버터 및 인버터와 같은 전력 변환 장치에서 발생이 가능하다.

그림 1에서와 같이 AC/DC 컨버터의 스위치 고장은 울트라 캐패시터 또는 배터리에 전원을 공급해주는 버스 전압에 직접적인 영향을 주고 버스 전압의 고조파 및 리플 특성을 악화시키게 된다. 울트라 캐패시터를 충전하고 방전하기 위한 감압 컨버터 및 승압 컨버터의 스위치 고장은 전기 자동차 시스템에서 에너지 저장을 불가능하게 만들어 치명적인 손실을 가져올 수 있다. 즉 구동용 전동기에 에너지 공급은 고장 당시 배터리 및 울트라 캐패시터에 저장된 에너지만이 가능하며 결국 전동기 구동이 불가능하게 된다. 배터리에 에너지를 저장하고 필요시 방전을 통해 전동기에 전력을 공급해 주

는 양방향 컨버터의 고장은 배터리로의 지속적인 에너지 저장이 불가능하여 전기 자동차의 효율을 저하시킨다. 또한 출력 인버터의 고장은 레그에 포함되어 있는 스위치의 고장으로 전동기를 구동하기 위한 인버터 출력 전압의 발생이 불가능하게 되거나, 왜곡된 전압 출력으로 전동기의 토크 리플이 발생하게 되고 이로 인한 전동기 부조 발생 및 운전 성능 악화의 결과를 초래한다. 그림 2는 EV 및 HEV에 있는 전력 변환 장치에서 스위치와 연계된 인덕터 및 전류 센서의 위치를 도시하고 있다. EV 또는 HEV에 사용되는 전력 변환 장치는 대부분 인덕터와 감압형 또는 승압형 컨버터, 그리고 저항과 인덕터 부하로 동작할 수 있는 전동기와 연결된 인버터가 주요 장치이다. 즉, 스위치의 개방형 고장이 발생하게 되면 스위치와 연계된 인덕터 전류 상에 비정상적인 파형 변화를 발생시키게 되며, 이러한 파형 변화로부터 특징점을 추출하여 고장을 검출하고 진단하게 된다. 특히 스위치 개방형 고장의 경우 감압형 컨버터에서는 출력단 인덕터 전류의 감소, 승압형 컨버터에서는 입력단 인덕터 전류의 감소의 형태로부터 특징점을 추출할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 스위치와 인덕터 전류의 연관관계를 통해 스위치 개방형 고장을 검출하고자 하며, 특히 승압형 컨버터의 스위치 개방형 검출 방식에 대해 제시하고 이를 다른 전력변환장치로 확장하고자 한다.

3. 제안된 승압 컨버터 스위치 개방형 고장 고장 검출 방식

승압 컨버터의 스위치 개방형 고장 검출은 별도의 전류 센서를 사용하여 스위치(S_1)에 흐르는 전류의 측정, 또는 스위치 양단의 전압을 측정하여 인가되는 PWM 파형과 비교하여 쉽게 구현할 수 있다. 그러나 이는 부가적인 전류 또는 전압 센서, 아날로그 회로 및 AD 컨버터를 필요로 한다. 따라서 본 논문에서는 별도의 센서 또는 소자를 사용하지 않는 새로운 스위치 개방형 고장 검출 방식을 제안한다. 제안된 스위치 개방형 고장 검출

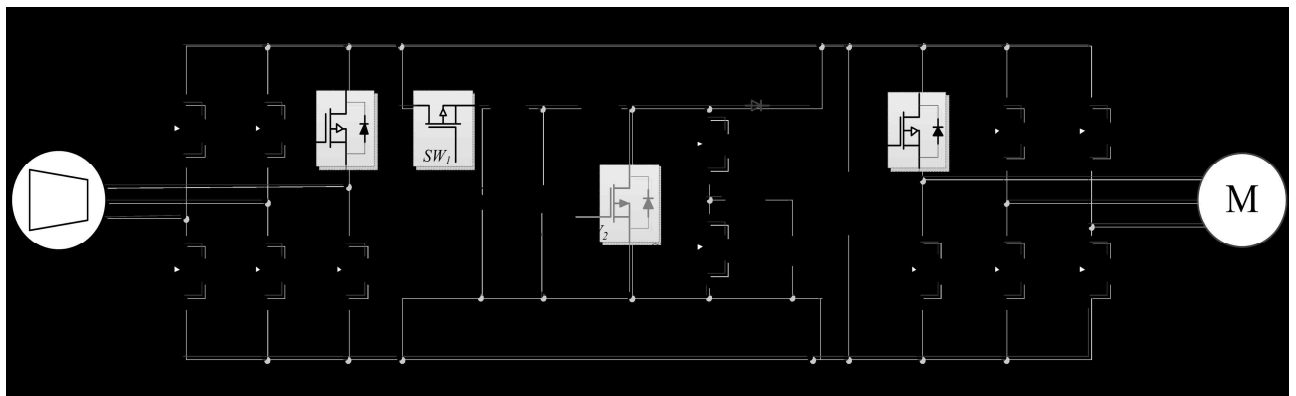
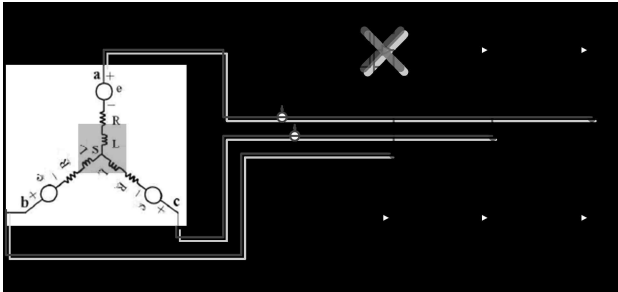
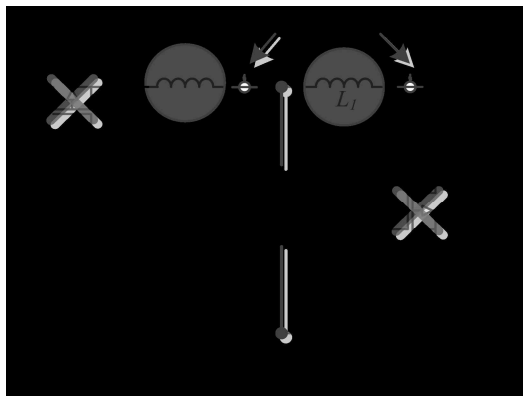


Fig. 1 HEV system configuration (fault locations are exemplified)

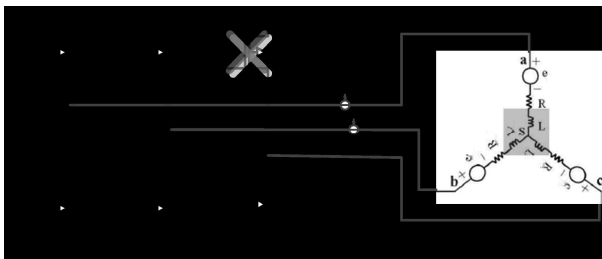
방식은 승압 컨버터의 전류제어를 위해 기존에 사용되어 온 전류 센서를 사용함으로써 저비용의 구현이 가능해진다.



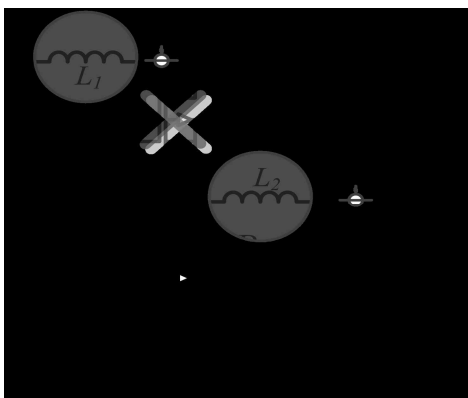
(a) AC/DC converter connected to an alternator



(b) Buck and boost converter for an Ultra-capacitor



(c) Inverter for driving a traction motor



(d) Bidirectional converter for battery

Fig. 2 Open Fault cases of Power converters for EV and HEV power conversion system

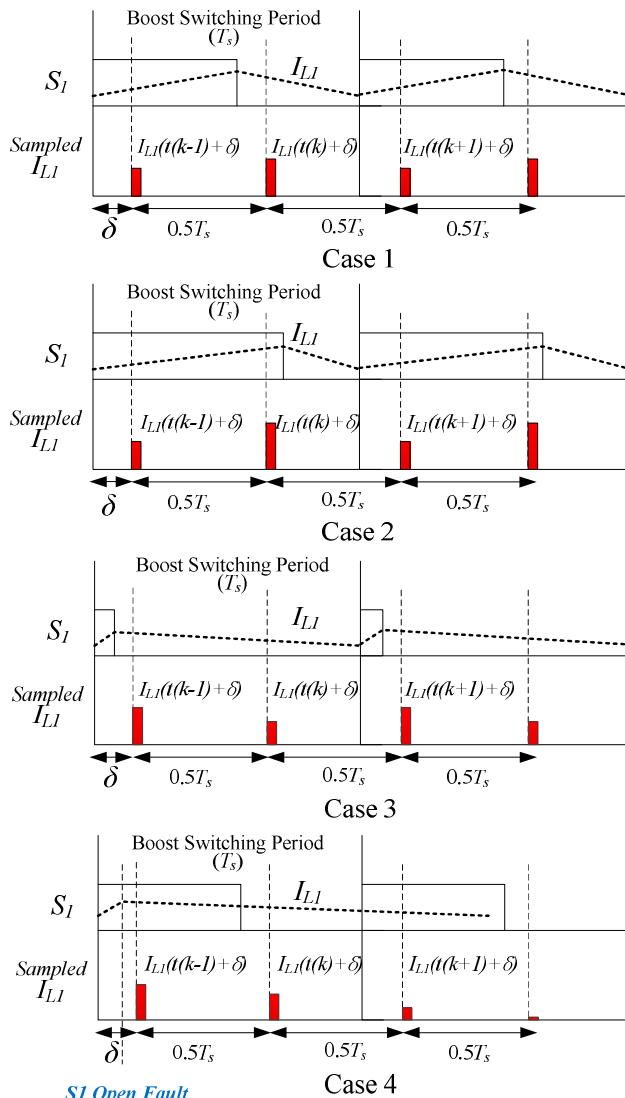
스위치(S_i)에 개방 고장이 발생되면 인덕터(L_i)에는 더 이상 에너지가 충전되지 않고, 기존에 인덕터에 충전된 에너지는 부하측으로 전달되게 되고 인덕터 전류 파형은 부하의 크기에 따라 급속하게 감소하는 형태를 가지게 된다. 따라서 승압 컨버터에 인가되는 시비율과 인덕터 전류의 기울기를 비교함으로써 스위치(S_i) 개방형 고장을 검출할 수 있다. 그림 3은 스위치(S_i)의 PWM 패턴, 인덕터 전류($I_{L_i}(t)$) 그리고 샘플링된 인덕터 전류($I_{L_i}(t(k-1)+\delta)$, $I_{L_i}(t(k)+\delta)$, $I_{L_i}(t(k+1)+\delta)$, $k=1,2,3\cdots$)를 도시하고 있다. 여기서 지연시간(δ)는 전류 제어 루프에서 전류가 샘플링되는 시점과 고장진단 루프에서 전류가 샘플링되는 시점간의 지연시간을 의미한다. 즉 DSP 프로그램 상에서 고장진단을 위한 타이머 인터럽트가 전류제어를 위한 타이머 인터럽트보다 지연시간(δ)만큼 느리게 시작하는 것을 의미한다.

스위치(S_i) 개방형 고장 검출을 위한 인덕터 전류의 샘플링은 승압 컨버터의 스위칭 주기의 $1/2(0.5T_s)$ 로 설정하고, PWM 인가 시점에 대해 지연 시간(δ , $\delta < 0.5T_s$)을 갖는 형태로 이루어진다. 여기서 고장 검출을 위한 전류 샘플링 주기를 전류 제어 주기의 $1/2$ 이하로 선정함으로써 한주기 내에서 전류의 변동 및 기울기를 획득할 수 있다. 실질적으로 스위치의 개방형 고장이 발생할 경우 인덕터 전류가 급격하게 감소하는 현상을 보여주기 때문에 가능한 최소의 주기로 전류의 샘플링을 수행하고 샘플링된 전류의 변화를 관찰한다면 보다 빠르고 정확한 고장진단이 가능하다. 하지만 본 논문에서는 하나의 전류 제어 주기 내에서 두 번의 전류 샘플링을 통해 얻어진 전류 데이터만으로 전류 파형의 변화를 파악할 수 있어 최소한의 전류 샘플링을 수행하도록 고장진단을 위한 전류 샘플링 주기를 스위칭 주기의 $1/2$ 로 선정하였다. 또한, 고장진단을 위한 전류 샘플링 주기 및 지연시간(δ)를 선정함에 있어 전류센서의 응답속도와 DSP내에 ADC 유닛의 변환 시간을 고려하여야 한다. 특히 고장진단을 위한 전류 샘플링 주기 및 지연시간(δ)은 전류를 샘플링하여 DSP 내에서 디지털값으로 변환하기 위한 전체 지연 시간을 고려하여 전체 지연 시간 이상으로 선정하여야 하며, 지연시간(δ)은 고장진단을 위한 샘플링 주기 이하로 선정하여야 한 주기 내에 전류 파형의 변화를 판단할 수 있다.

제안된 고장 검출 방법을 구현하기 위해서는 전류 제어를 위한 전류 샘플링 주기에 비해 두배의 샘플링 주기를 포함하는 단점은 있으나, 전기 자동차용 전력변환 장치의 경우 고용량의 전력을 사용하기 때문에 소형 DC/DC 컨버터의 전류 제어 주파수에 비해 충분히 낮은 전류 제어 주기 및 샘플링 주파수를 가지고 있고, 특히 고성능의 DSP가 기본적으로 탑재되어 있어 한 주기 내에서의 다수의 샘플링은 기존 성능 변화에 거의 영향이 없다고 볼 수 있다.

그림 3에서와 같이 승압 컨버터가 정상적으로 동작할

경우(Case 1, 2, 3,) 두 주기 내에서 샘플링된 전류의 크기는 거의 동일하게 된다. 즉 $I_{L1}(t(k-1)+\delta)$ 과 $I_{L1}(t(k+1)+\delta)$ 의 샘플링 크기는 거의 동일하다. Case 1, 2의 경우는 턴온시간이 지연시간(δ)보다 큰 경우로 $I_{L1}(k)$ 의 크기는 $I_{L1}(t(k-1)+\delta)$ 또는 $I_{L1}(t(k+1)+\delta)$ 보다 큰 값을 가지게 된다. Case 3의 경우는 턴온시간이 지연시간(δ)보다 작은 경우로 $I_{L1}(t(k)+\delta)$ 의 크기는 $I_{L1}(t(k-1)+\delta)$ 또는 $I_{L1}(t(k+1)+\delta)$ 보다 작은 값을 가지게 된다. Case 4의 경우는 승압 컨버터의 스위치(S_1)에 개방 고장이 발생할 경우로서 인덕터 전류(I_{L1})은 지속적으로 감소하게 되어 $I_{L1}(t(k-1)+\delta) > I_{L1}(t(k)+\delta) > I_{L1}(t(k+1)+\delta)$ 의 관계를 가지게 된다. 스위치의 턴온시간에 따른 샘플링된 인덕터 전류의 관계는 표1과 같다. 따라서 샘플링된 전류의 크기를 비교하고 표1의 연관관계를 이용하여 스위치(S_1)의 개방형 고장을 간단한 구조의 알고리즘을 통해 구현할 수 있다. 제안된 스위치 개방형 고장 검출 방식



SI Open Fault

Fig. 3 the inductor current (I_{L1}) and the PWM patterns: Case 1,2,3-Normal state; Case 4-the switch (S_1) open fault

Table 1 The relations of the sampled inductor currents

Case	Equation
Case1 (Normal)	$I_{L1}(t(k)+\delta) > I_{L1}(t(k-1)+\delta) \approx I_{L1}(t(k+1)+\delta)$
Case2 (Normal)	$I_{L1}(t(k)+\delta) > I_{L1}(t(k-1)+\delta) \approx I_{L1}(t(k+1)+\delta)$
Case3 (Normal)	$I_{L1}(t(k)+\delta) < I_{L1}(t(k-1)+\delta) \approx I_{L1}(t(k+1)+\delta)$
Case4 (Fault)	$I_{L1}(t(k-1)+\delta) > I_{L1}(t(k)+\delta) > I_{L1}(t(k+1)+\delta)$

Table 2 Experimental Parameters

Nominal input voltage	7V	Switching frequency	40kHz
Nominal output voltage	14V	Inductor (L_1)	0.8mH
Nominal output current	4A	Inductor (L_2)	0.6mH
Battery	4V, 3Ah	Switches (MOSFET)	30A, 600V

은 승압형 컨버터 뿐만 아니라, 인덕터와 연계되어 출력 측 전류를 측정하여 전류제어를 수행하는 EV 및 HEV 내에 다른 DC/DC 컨버터에도 적용할 수 있으며, 기존의 센서를 그대로 사용하고 검출 알고리즘만을 부가하여 구현가능함으로서 고성능, 저비용의 고장검출 방식을 실제 구현할 수 있다.

4. 실험 결과 및 고찰

본 논문에서 제안된 방식은 Texas Instrument사의 TMS320F2812 DSP 시스템 및 BLDC 전동기 시스템을 통해 실험적으로 구현되었다. 실험에 사용된 파라미터는 표 2와 같다. 전체 시스템은 실험의 간략화를 위해 스케일을 축소하여 구현하였다. 실제 승압 컨버터의 스위치 (S_1)의 고장은 운전중의 상황을 재현하기 위해 BLDC 전동기를 일정토크 모드로 구동시키면서, DSP 내에서 해당 PWM 포트를 통해 스위치(S_1)의 드라이버 출력을

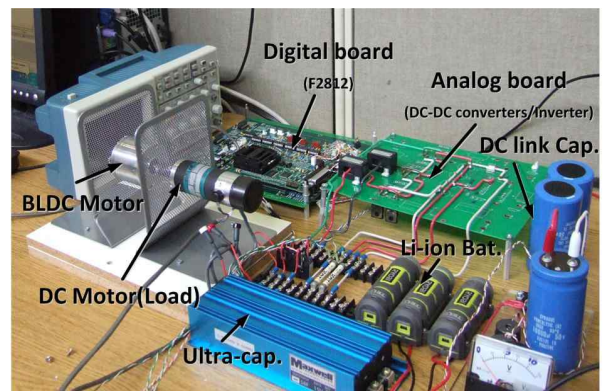


Fig. 4 Experimental setup

제어하여 스위치(S_1)이 특정 시점에 개방되도록 하였다. 또한, 에너지 저장장치로서 리튬이온 배터리를 사용하였고 충전 전압은 4.2V로 선정하였으며 PWM 주기는 40kHz로 설정하였다. 그림 4는 전체적인 실험 세트를 보여주고 있다. 본 논문에서 사용하고 있는 전류센서는 타무라의 S22P(15A)의 전류센서를 사용하고 있고 응답 속도는 1 μ s이며, 사용한 DSP TMS320F2812에서 8채널을 가지는 하나의 ADC 유닛의 전체 변환시간은 6.2 μ s으로 한 채널당 0.775 μ s의 변환시간이 필요하고 전류를 샘플링하는데 1.775 μ s의 지연시간이 기본적으로 필요하다. 따라서 본 논문에서는 신호 처리를 위한 필터링과 판단을 고려하여 전류제어 주기의 1/2인 12.5 μ s을 고장 진단을 위한 전류 샘플링 주기로 선정하였다. 물론 샘플링 주기를 보다 작게 선정한다면 더욱 정확한 판단이 가능하겠지만, 두 배의 샘플링만으로도 한주기 동안의 전류 변화를 판단할 수 있고 최소한의 DSP 부담을 위해 1/2로 선정하였다. 또한, 하나의 전류센서로부터 전류를 샘플링하기 위해서는 최소한 1.775 μ s의 시간이 필요하기 때문에 전류제어를 위한 타이머 인터럽트 서비스 루틴에 비해 1.775 μ s 이상의 지연시간을 가지고 샘플링을 위한 타이머 인터럽트 서비스루틴이 시작된다면 동일한 전류 센서로부터 전류를 샘플링하는데 전혀 문제가 없다. 따라서 본 논문에서는 8채널을 포함하는 ADC 유닛의 전체 변환 시간(6.2 μ s) 및 신호처리 시간을 고려하여 지연시간 (δ)를 7 μ s으로 하였다.

그림 5(a)는 스위치(S_1)의 턴온 시간이 지연시간보다 크고 주기의 50%이하 일 경우의 인덕터 샘플링 전류 및 개방형 고장 발생을 보여주고 있다. 그림 5(b)는 스위치(S_1)의 턴온시간이 샘플링 지연시간보다 길고 주기의 50% 이상일 경우의 인덕터 샘플링 전류 및 개방형 고장 발생에 관한 것이고, 그림 5(c)는 스위치(S_1)의 턴온 시간이 지연시간보다 작을 경우의 인덕터 샘플링 전류 및 개방형 고장 발생을 보여주고 있다. 그림 5(a)에서 5(c)의 경우 모두 스위치(S_1) 개방형 고장이 발생시 인덕터 전류가 감소됨을 알 수 있으며, 표1의 샘플링된 인덕터 전류의 연관관계를 통해 스위치(S_1)의 개방형 고장 검출을 용이하게 수행할 수 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서 EV 및 HEV 에너지 변환 시스템에서 발생가능한 스위치 개방형 고장 검출 방식을 제공하는 것을 목적으로 하고 있고, 제안된 방식은 기존의 전류 센서를 사용하여 개방형 사고 발생시 인덕터 전류의 파형을 근간으로 지연을 갖는 전류 샘플링 방법과 고장시 발생하는 인덕터 전류의 특성을 이용하고 있으며, 별도의 전류센서 및 부가 회로가 필요 없는 간단한 구조와 고속의 스위치 개방형 고장 검출 방법이다. 또한, 제안된 스위치 개방형 고장 검출 방식은 TMS240F2812 DSP

시스템을 이용해 구현하였고, 실험을 통해 제안된 방식의 타당성을 검증하였다.

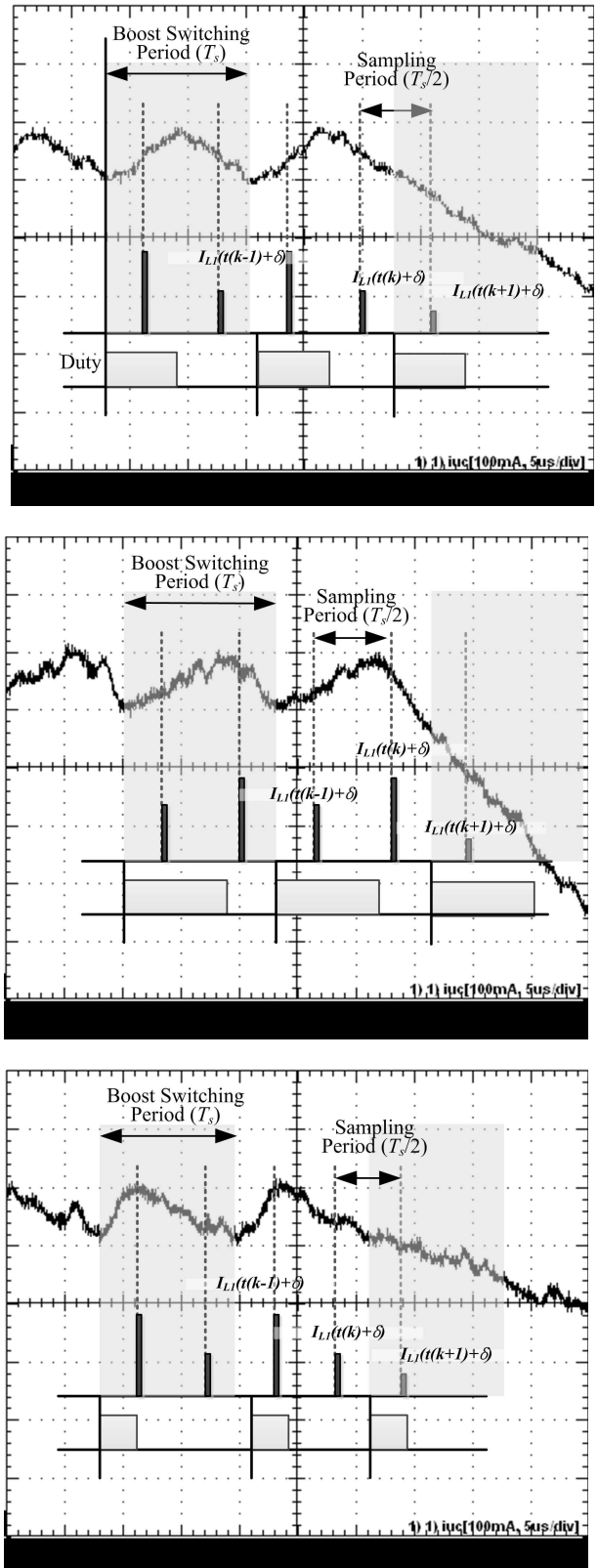


Fig. 5 Experimental results: (a) Case 1; (b) Case 2; (c) Case 3; I_{L1} [100mA, 5 μ s/div];

참고 문헌

- [1] A. Emadi, K. Rajashekara, S. S. Williamson, and S. M. Lukic, "Topological overview of hybrid electric and fuel cell vehicular power system architectures and configurations," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, Vol. 54, No. 3, pp. 763 - 770, May 2005.
- [2] A. Emadi, K. Rajashekara, S. S. Williamson, and S. M. Lukic, "Topological overview of hybrid electric and fuel cell vehicular power system architectures and configurations," *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, Vol. 54, No. 3, pp. 763 - 770, May 2005.
- [3] M. A. Awadallah, "Detection of stator short circuits in VSI-fed brushless DC motors using wavelet transform," *IEEE Trans. Ener. Conv.*, Vol. 21, No. 1, pp. 1-8, 2006.
- [4] D. Kastha and B. K. Bose, "Investigation of fault modes of voltage-fed inverter system for induction motor drive," *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, Vol. 30, pp. 1994.
- [5] R. Peugot, S. Courtine, and J. P. Rognon, "Fault detection and isolation on a pwm inverter by knowledge-based model," *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, Vol. 34, pp. 1998.
- [6] S. Bolognani, M. Zordan, and M. Zigliotto, "Experimental fault-tolerant control of pmsm drive," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Vol. 47, pp. 2000.
- [7] Khan, M. Rahman, M.A., "Development and Implementation of a Novel Fault Diagnostic and Protection Technique for IPM Motor Drives, Industrial Electronics", *IEEE Transactions on*, Vol. 56, No. 1, pp. 85-92, Jan. 2009.
- [8] Karimi, S. Gaillard, A. Poure, P. Saadate, S., "FPGA-Based Real-Time Power Converter Failure Diagnosis for Wind Energy Conversion Systems," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, Vol. 55, No. 12, pp. 4299-4308, Dec. 2008.
- [9] T. Kim, W. Lee, and D. Hyun, "Detection Method for Open-Circuit Fault in Neutral-Point-Clamped Inverter Systems," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, Vol. 56, No. 7, pp. 2754-2763, July 2009.
- [10] Hag-Wone Kim, "Simple Switch Open Fault Detection Method for Voltage Source Inverter," *The Trans. of the KIPE*, Vol. 13, No. 6, pp. 430-438, 2008.
- [11] Sung-Guk Ahn, Byoung-Gun Park, Rae-Young Kim, Dong-Seok Hyun, "Fault Diagnosis Scheme for Open-Phase Fault of Permanent Magnet Synchronous Motor Drive using Extended Kalman Filter," *The Trans. of the KIPE*, Vol. 16, No. 2, pp. 191-198, 2011.
- [12] Raphael Peugot, Stephane Courtine and Jean-Pierre Rignon, "Fault Detection and Isolation on a PWM inverter by Knowledge-Based Model," *IEEE Trans. on Industry Applications*, Vol. 34, No. 6, Nov. 1998.
- [13] Hee-Keun Shin, Byoung-Woong An, Hag-Wone Kim, Kwan-Yuhl Cho, Shin-Myung Jung, "Switch Open Fault Detection and Tolerant Operation Method for Three Phase PWM Rectifier," *The Trans. of the KIPE*, No. 17, No. 3, pp. 266-273, 2012.



박태식(朴太植)

1972년 1월 19일생. 1996년 고려대 전기공학과 졸업. 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2000년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 2000년~2005년 삼성전자 책임연구원. 2010년~2011년 미국 University of Michigan Researching fellow. 2005년~현재 특허청 사무관.