

# 아날로그 회로로 구현가능한 평균전류제어 저손실 bypass 전류센싱방법

김석희<sup>1</sup>, 최병민<sup>1</sup>, 박종후<sup>†</sup>, 전희종<sup>1</sup>

## The Analog-circuited Low-loss Bypass Current Sensing Method for Average Current Mode Control

Seok-Hee Kim<sup>1</sup>, Byung-Min Choi<sup>1</sup>, Jung-Hu Park<sup>†</sup>, and Hee-Jong Jeon<sup>1</sup>

**Abstract** - This paper proposes a low power-loss averaging current mode control using a resistor and bypass switch. Generally, current sensing method using a resistor has a disadvantage of power loss which degrades the efficiency of the entire systems. On the other hand, proposed measurement technique operating with bypass-switch connected in parallel with sensing resistor can reduce power loss significantly the current sensor. An analog-circuited bypass driver is implemented and used along with an average-circuit mode controller. The bypass switch bypasses the sensing current with a small amount of power loss. In this paper, a 50[W] prototype average current mode boost converter has been implemented for the experimental verification.

**Keywords:** shunt resistor, current measurement, averaging current mode control, current sampling, bypass switch, high efficiency, sample-and-holder

### 1. 서 론

모든 전기·전자제품은 안전한 동작영역을 확보하고 최적의 성능을 구현하기 위한 적정 전압과 전류값을 가지고 있다. 하지만 외부 환경 조건이 변화하여 부하 및 동작점이 변화하는 경우 안전한 동작영역을 확보하지 못하게 된다. 또한 변동이 클 경우에는 시스템의 이상동작이 발생할 수 있으므로, 안정적인 동작을 위해서 시스템 환경이 변하더라도 최적의 전압과 전류를 유지할 수 있도록 하는 시스템 제어 기술이 필요하다. 하지만 이 제어 기술을 적용하기 위해서는 무엇보다 시스템의 전압·전류를 정확하게 측정하는 센싱방법 중요하다. 전압 측정의 경우 간단하게 측정 할 수가 있지만 이와는 달리 전류측정은 간단하지 않으며 방법 또한 여러 가지이다.<sup>[1-3]</sup> 시스템에 직접 저항을 연결하는 션트저항 측정법,

비 접촉식인 변압기 원리를 이용한 전류 변압기(CT) 측정법, hall effect 효과를 이용한 hall IC 측정법, 자기저항효과를 이용한 MR(Magneto Resistive)센서 측정법등이 있다.<sup>[4-8]</sup> 션트저항 측정법은 가격이 싸고 회로구현이 간단하지만 저항에 전류를 흐르게 함으로써 전력손실이 있다는 단점이 있으며 전류변압기(CT) 측정법은 변압기의 누설 인덕턴스에 의한 노이즈가 발생하며 가격이 비싸고 부피가 크다는 단점이 있다. Hall IC 측정법 역시 가격이 비싸며 추가 전압원이 필요하다는 단점이 있다. 마지막으로 MR센서 역시 가격이 비싸고 구성이 복잡하다는 단점이 있다.<sup>[9-14]</sup>

이러한 문제점들을 보완하기 위하여 본 논문에서는 저손실 션트저항 측정법을 이용한 평균전류 제어기법을 제안하였다. 제안하는 방법은 기존의 션트저항 측정방법의 단점인 저항손실 발생을 보완하는 방법으로서, Turn On 저항이 매우 작은 MOSFET을 전류 감지 저항에 병렬로 연결하여 전류측정이 되는 짧은 시간 동안만 전류를 전류 감지 저항에 흐르게 하여 전류 정보를 얻는 방법으로, 전류 정보를 얻고 난 후 바로 센싱에 불필요한 전류를 낮은 저항값의 바이패스 스위치로 바이패스시킴으로써 전력손실을 줄이는 방법이다. 또한 샘플-앤-홀드를 사용하여 션트 저항을 스위치 바로 아래 직렬로 연

Paper number: TKPE-2014-19-2-5

Print ISSN: 1229-2214 Online ISSN: 2288-6281

<sup>†</sup> Corresponding author: wait4u@ssu.ac.kr, Dept. of Electrical Engineering, Soongsil University  
Tel: +82-2-828-7269 Fax: +82-2-817-7961

<sup>1</sup> Dept. of Electrical Engineering, Soongsil University  
Manuscript received Aug. 28, 2013; accepted Dec. 30, 2013

— 본 논문은 2013년 전력전자학술대회 우수추진논문임

결 시켜서 턴-온 시에만 전류를 측정하여 손실을 최소화 하면서 인덕터 전류의 평균값과 동일한 값을 센싱할 수 있도록 유도하였다.

본 논문에서는 제안하는 저손실 섀트저항 측정방법으로 평균 전류 모드 제어방식의 부스트 컨버터에 적용하여 같은 조건 하에 기존 섀트저항 측정법과 비교하여 본 논문에서 제안하는 방식이 저항손실 측면에서 우수함을 증명하였다.

2.1절에서는 본 논문에서 제안하는 바이패스 기법의 센싱방법의 원리를 설명하였고 2.2절에서는 아날로그로 평균모드제어 부스트 컨버터 구현방법과 동작원리, 그리고 회로구성도와 시뮬레이션 파형을 설명하였으며, 2.3절에서는 제안된 바이패스 측정방법을 2.2절에서 설명한 아날로그 평균모드제어 부스트 컨버터에 적용하여 동작되는 컨버터의 회로구성도 및 시뮬레이션 파형을 설명하였다.

## 2. 본 론

### 2.1. 바이패스 센싱방법의 원리

본 논문에서 제안한 바이패스는 센싱시 필요하지 않은 전류를 손실이 거의 없는 다른 경로로 흘려보냄으로써 섀트 저항에 걸리는 손실을 최소화 시키는 역할을 한다.

그림 1은 주 스위치 PWM과 바이패스 스위치의 PWM타이밍을 나타내었다. 그림 1과 같이 주 스위치에 바이패스의 타이밍이 아래와 같이 동작하게 되면 전류 파형이 Bypass PWM동작에 의해 일부가 다른 경로로 흐르게 되어 아래와 같은 전류파형의 결과만 남게 된다.

이미 기존에 바이패스 전류 측정 디지털 제어방식에서는 그림 2와 같이 DSP에서 ADC의 SOC(Start Of Conversion)와 EOC(End Of Conversion)동작을 설정하여 샘플링 (sampling) 시, 필요한 인덕터 전류 평균값만 센싱(sensing)하고, 그 외의 시간에서는 전류를 센싱하지 않고 센싱한 전류값을 유지(Holding) 한다. 하지만 위와 같은 디지털 센싱 동작을 아날로그 회로로 구현하기 위하여 샘플-앤-홀드 IC를 사용하여 센싱시 필요한 전류 평균값을 센싱하고 그 외의 시간에는 홀딩할 수 있도록 하였다.<sup>[15]</sup>

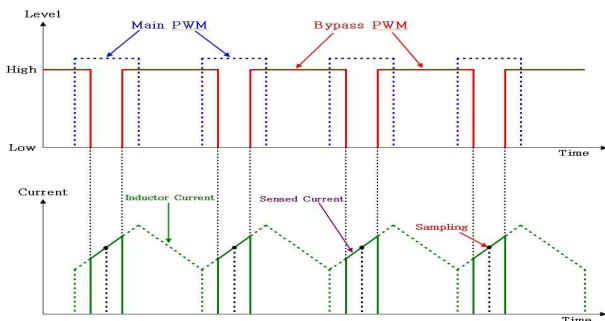


Fig. 1 The operating principle of the main switch and bypass switch PWM generation for average current mode control

### 2.2. 아날로그 평균전류모드제어 부스트 컨버터

그림 3은 아날로그 회로로 구현한 섀트저항 전류센싱 평균전류모드 제어 회로 구성이다. 스위치 전류의 중간값을 제어함으로써 궁극적으로 인덕터 전류의 평균값을 제어하게 된다. 본 논문에서는 아날로그 평균전류모드 제어를 위해서, 기존 디지털 방식 대신에 샘플-앤-홀드를 사용하여 스위치 PWM 중간값을 측정하게 된다. 그림 3을 보면 발진회로에서, 출력(Clock) 및 이와 동기화된 삼각파( $V_{ramp}$ )를 발생시켜, 보상기 출력의 제어전압( $V_{com}$ )과 비교하여 주 스위치의 PWM(Main PWM)을 만든다. 제어기의 동특성이 스위칭에 비해서 매우 느리다고 가정하면, 제어전압은 삼각파에게 거의 직류처럼 보이므로 그림 4와 같이 삼각파가 최소인 순간이 주 스위치 PWM의 중간지점이 되어 인덕터 전류의 평균지점과 동일하게 된다. 따라서 그림 3과 같이, 제어전압( $V_{com}$ )을 삼각파와 비교하여 주 스위치 PWM을 만들고, 그림 5와 같이, 클럭 발생 시 인덕터 혹은 스위치 전류를 센싱하여 샘플-앤-홀드를 통하여( $V_{sen}$ ) 보상기에 전달하여, 이를 레퍼런스 전압( $V_{ref}$ )을 추종하게 한다.

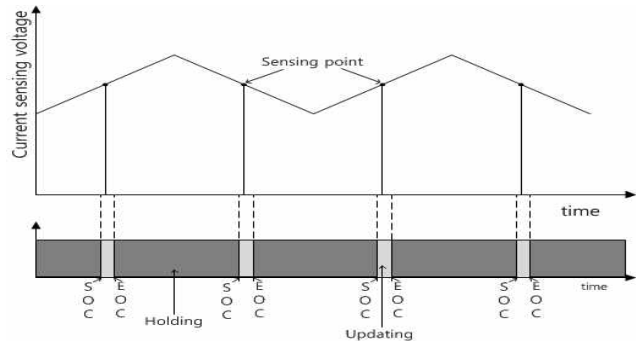


Fig. 2 Operating principle of current sensing using a shunt resistor and digital-signal processor

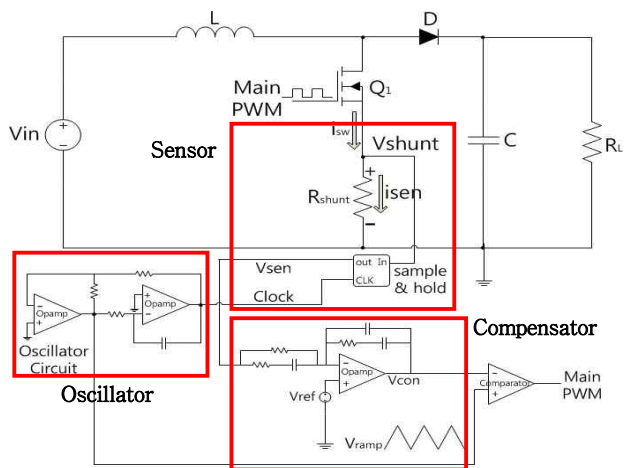


Fig. 3 Proposed average current mode control boost converter circuit configuration

### 2.3. 바이패스 측정방법을 적용한 평균전류모드제어 부스트 컨버터

그림 6은 본 논문에서 제안한 바이패스 스위치를 이용한 션트저항 전류 센싱 측정법을 적용한 회로다. 동작 특성은 앞서 설명했던 아날로그 평균전류모드 제어 방식과 동일하다. 하지만 앞에서의 아날로그 평균전류모드 제어 방식은 스위칭 전류( $i_{sw}$ )가 모두 션트 저항을 지나므로 항상 손실이 발생하게 된다. 본 논문에서 제안하는 저손실 션트 저항 측정방법은 그림 6에서처럼 바이패스 스위치를 션트 저항에 병렬로 구성하여 바이패스 턴-오프 시에는 전류 평균값만 션트저항에서 측정이 되고 턴-온 시에는 전류가 바이패스 스위치를 통해 빠져 나가므로 측정에 필요한 최소한의 전류만 도통하여 션트 저항에 흐르는 전류를 감소시킴으로써, 저항 손실을 감소시킨다. 발진회로에서 나오는 삼각파와 바이패스용 레퍼런스 전압( $V_{ref\_bypass}$ )을 비교하여 원하는 바이패스 PWM을 만들어 낼 수 있다.

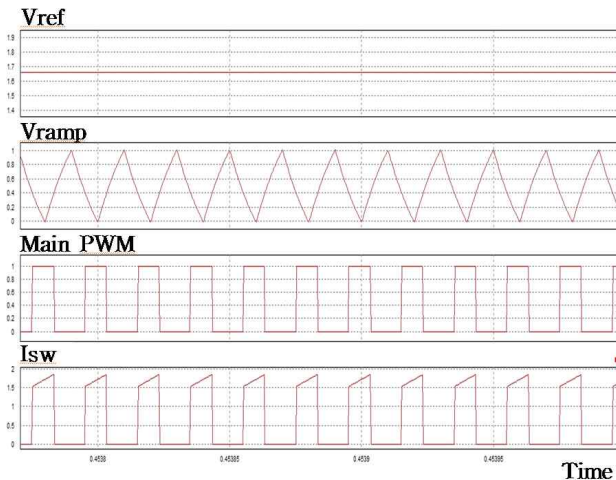


Fig. 4 Main waveform of analog circuited average current mode control converter

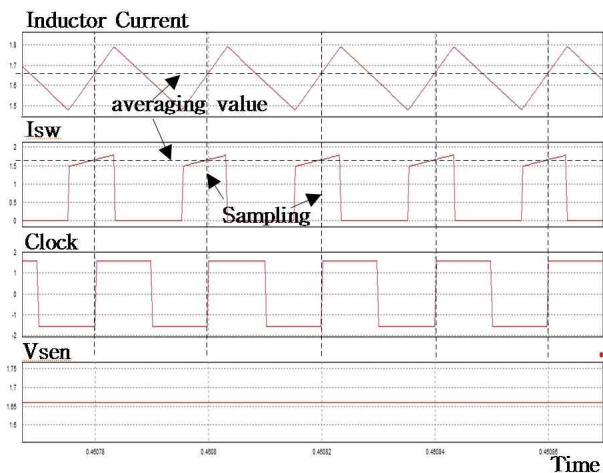


Fig. 5 current sensing method using sample and hold circuit

그림 7은 본 논문에서 제안한 바이패스 스위치를 적용한 평균전류모드제어 부스트 컨버터 동작 파형이다.

그림 7에서 발진회로에서 만들어지는 클럭을 적분하면  $V_{ramp}$ 가 되는데 삼각파의 최소점이 되는 순간은 이 Main PWM의 중앙이며, 스위칭전류( $I_{sw}$ )의 턴-온시간의 중앙이므로 인덕터 전류가 평균값을 갖는 순간과 일치하게 된다. 그러므로 비교기를 통해 삼각파와 일정 레퍼런스 전압( $V_{ref\_bypass}$ )을 조절하여 바이패스 PWM을 구현해 낼 수 있다. 그렇게 구현된 바이패스 PWM은 스위칭 전류( $I_{sw}$ )를 바이패싱하여 평균값 센싱을 위한 최소한의 전류( $I_{sen}$ )로 만들어 내고 있는 것을 볼 수 있다.

### 2.4. 효율분석

기존의 션트저항 측정방식의 소비전력( $P_{sen,loss}$ )은 단순히 션트저항( $R_{shunt}$ )에 흐르는 실효치 전류( $i_{sen}$ )와의 관계를 이용하여 소비전력( $P_{Rshunt}$ )을 구할 수 있다. [4-5]

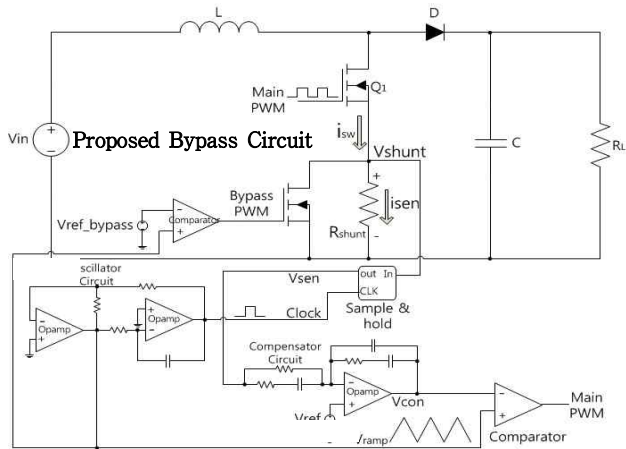


Fig 6 Average current mode control boost converter circuit configuration applying the proposed sensing method

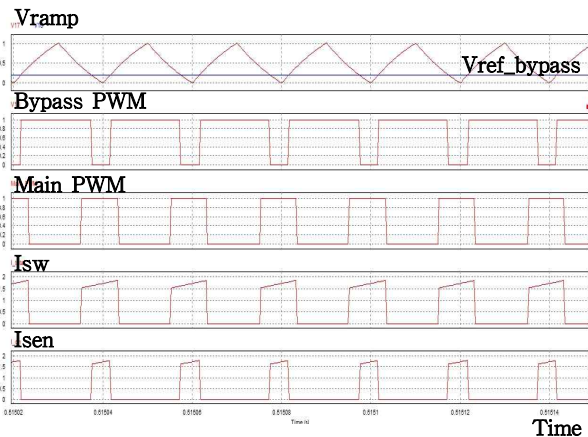


Fig. 7 Main waveform of average current mode control boost converter applying proposed sensing method

$$P_{sen,loss} = P_{Rshunt} \quad (1)$$

$$P_{Rshunt} = I_{sen,s}^2 \cdot R_{shunt} \quad (2)$$

(단,  $I_{sen,s} = I_L \sqrt{D_{on}}$ ,  $D_{on}$ 은 주스위치도통비)

제안하는 션트저항 측정방식의 소비전력( $P_{sen,loss}'$ )은 션트저항의 소비전력( $P_{Rshunt}'$ )과 병렬로 연결한 바이패스 MOSFET스위치의 소비전력( $P_{MOSFET}$ )의 합으로 구할 수 있다. 여기서 션트저항에서의 소비전력은 바이패스 MOSFET스위치가 off 되는 시간  $(1 - D_{bypass})T$ 에서만 존재하므로 이 시간을 고려한다. 바이패스 스위치의 소비전력을 살펴보면 MOSFET스위치에 전류가 흐를 시 생기는 저항값( $R_{DS}$ )에서의 소비전력( $P_{cond}$ )과 스위치 상태 변화에 따른 스위칭 손실( $P_{sw}$ )의 합이다. 그리고 스위치 상태 변화에 따른 소비전력은 스위치가 on에서 off 상태로 변할 시 생기는 스위칭손실( $P_{off}$ )과 스위치가 off에서 on상태로 변할 시 생기는 스위칭손실( $P_{on}$ )의 합으로 표현된다.<sup>[16-17]</sup>

$$P_{sen,loss}' = P_{Risen}' + P_{MOSFET} \quad (3)$$

$$P_{Risen}' = I_L^2 \cdot R_{shunt} \cdot (1 - D_{bypass}) \quad (4)$$

$$P_{MOSFET} = P_{cond} + P_{sw} \quad (5)$$

$$P_{cond} = I_L^2 \cdot R_{DS} \cdot (D_{on} + D_{bypass} - 1) \quad (6)$$

$$P_{sw} = P_{off} + P_{on} \quad (7)$$

여기서 스위치 상태 변화에 따른 스위칭 손실은 극히 작은 값이므로 본 논문에서는 고려하지 않았다.

본 논문에서는 입력 전압 30V에 입력전류 1.7A를 사용하였으므로 기존의 저항센서의 소비 전력은 식 (1),(2)를 통해 다음과 같은 값을 가진다.

$$P_{sen,loss} = P_{Rshunt} = 1.154[W] \quad (8)$$

제안하는 shunt 저항 측정방법에서의 소비전력은 식 (3)-(8)에 의해 다음과 같은 값을 가진다.

$$P_{Risen}' = 0.289[W]$$

$$P_{cond} = 0.11271[W]$$

$$P_{sen,suggest} = P_{Risen}' + P_{cond} = 0.40171[W] \quad (9)$$

따라서, 손실이 이론상 약 65% 감소함을 예상할 수 있다.

### 3. 실험

#### 3.1. 실험 구성

컨버터의 주 스위치는 MOSFET(IRFP350)을 사용하였고, 제어부는 비교기(LM339N)와 OPAMP(TL084)를 사용하였다. 바이패스용 스위치는 IRF530을 사용하였고 샘플-앤-홀드(LF398)를 사용하여 전류파형의 샘플링 값을 측정하였다. 그림 8은 실험을 위한 하드웨어이며 표 1에 실험조건과 파라미터를 나타내었다.

Table 1 Specification of the hardware

Main Switch	IRFP350
Bypass Switch	IRF530
Inductor, L	720[uH]
Capacitor, C	330[uF]
Shunt Resistor	1[Ω]
Switching Frequency	50[kHz]
Vin	30[V]
Vout	50[V]
Load Resistance	50[Ω]
Output Power	50[W]

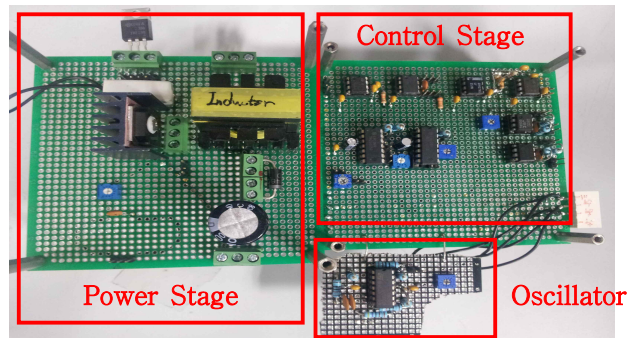


Fig. 8 Hardware of average current mode control boost converter applying to the proposed sensing method

#### 3.2. 실험 결과

그림 9는 제안된 션트 저항 센싱 방법의 평균전류모드 제어 부스트 컨버터 실험 결과 파형이다. 주 스위치 PWM과 바이패스 스위치 PWM, 그에 따른 전류 파형의 모습이다. 기존의 주 스위치 PWM 쪽의 스위칭 전류 파형에서 센싱되는 부분을 제외한 나머지가 바이패스 PWM에 의해 바이패싱 됨을 확인할 수 있다.

그림 10은 기존의 션트 저항 센싱 방법에서의 션트 저

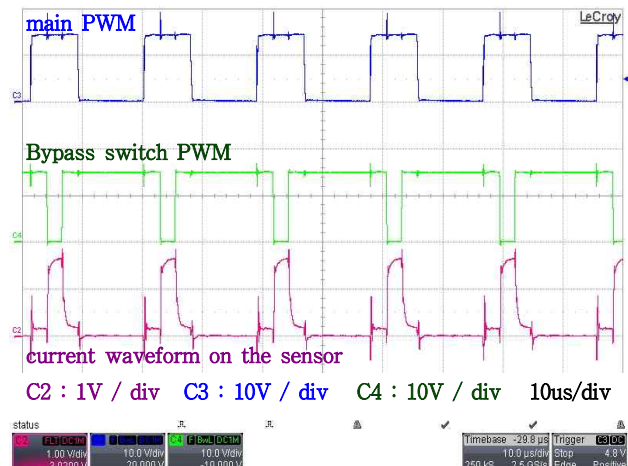


Fig. 9 Current sensing waveform by the proposed method

항에 흐르는 전압, 전류, 전력파형이고, 그림 11은 제안된 방법의 션트 저항에 흐르는 전압, 전류, 전력파형이다. 측정된 데이터를 정리해놓은 표 2를 보면 기존센싱 방법과 제안된 센싱방법의 이론값과 실험값이 거의 비슷하다는 것을 확인 할 수 있다. 결과적으로 제안된 바이패스 션트저항 센싱 측정법은 센싱하는 부분은 남기고 센싱에 필요없는 전류는 바이패스 스위칭을 통해 빠져나가기 때문에 센싱시 소비되는 전력이 감소되었음을 알 수 있다.

본 논문에서는 HVDC 시스템에서 사용되는 Thyristor 밸브의 스위칭 동작을 다양하게 테스트하는 새로운 구조의 합성시험회로를 제안하였다. 제안하는 합성시험회로는 2상 초퍼를 이용하여 턴-온 전류를 공급하고, 턴-오프 시 역방향과 순방향 전압은 기존의 인덕터, 커패시터, 보조밸브로 구성된 공진회로를 이용하는 구조로 되어있다. 제안하는 합성시험회로의 동작과 성능을 분석하기 위해 시뮬레이션 모델을 개발하고 분석을 실시하였다. 또한 시뮬레이션 분석을 기반으로 하드웨어 축소모

Table 2 comparison of sensing power loss

	estimation	measurement
Conventional method	1.154[W]	1.156[W]
Proposed bypass method	0.4017[W]	0.455[W]

형을 제작하고 실험을 실시하여 실제 합성시험회로를 개발하는데 활용할 수 있도록 하였다. 제안하는 합성시험회로는 기존 개발된 시스템에 비해 구조와 동작이 간단한 장점을 갖고 있어 실규모 시험설비로 확장할 경우 비용과 운영 측면에서 많은 장점이 있을 것으로 예측된다. 제안된 방식의 main MOSFET은, 저항센서에 의해서 측정전압만큼 floating 되는데, 그림 9의 실험파형에서 보이는 바와 같이, 이 전압은 최대 1.5V에 불과하다. 일반적으로 구동회로는 10V 이상을 주므로, floating 전압이 MOSFET 구동에 영향을 주지 않는다. 따라서 기존 회로를 사용해도 무방함을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 기존의 션트 저항을 이용한 전류 측정 방법을 보완한 바이패스 스위치를 이용한 아날로그 회로 방식의 저손실 션트 저항 전류측정방법을 제안하였고, 성능을 비교하였다. 평균전류모드 제어방식의 부스트 컨버터를 통해 기존 방식보다 제안된 전류 측정 센싱 방식이 션트저항에서 소비전력이 약 60%(실험값 기준)가 더 낮음을 보였다. 결론적으로 본 논문에서 제안하는 바이패스 스위칭 센싱 기법이 기존의 측정방식에 비해서 더 효율적이라는 것을 확인하였다.

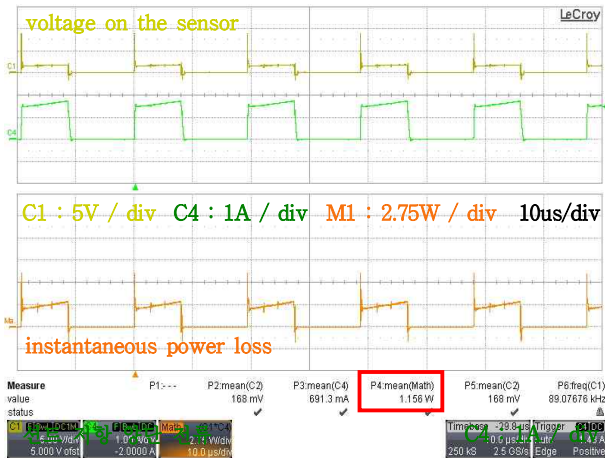


Fig. 10 Voltage, current, power of conventional sensing method in shunt resistor

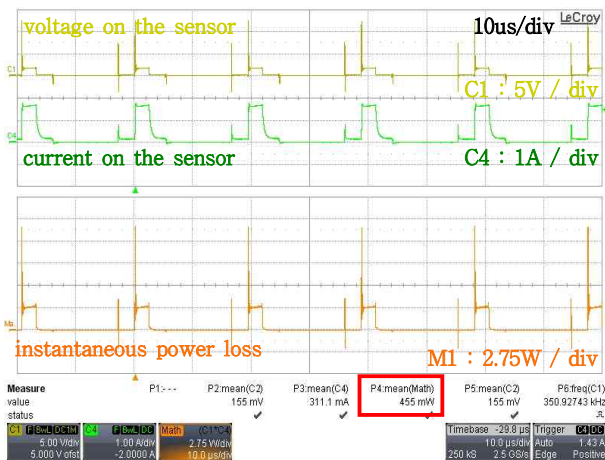


Fig. 11 Voltage, current, power of proposed sensing method in the shunt resistor

This work was supported by the Human Resources Development Program (No. 20124030200070) of Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning grant by the Korea Government Ministry of Knowledge Economy.

#### References

- [1] Hwa-Seok Lee, I. Daniel Thena Thayalan, Joung-Hu. Park, "Low Power-loss Current Measurement Technique Using Resistive Sensor and Bypass Switch," *The Transactions of the Korean Institute of Power Electronics*, pp. 416-419, Oct. 2012.
- [2] Do-Yun Kim, "Phase Current Sensing Method Using Three Shunt Resistor for Three Phase Inverter," *2011 Power Electronics Annual Conference*, pp. 235-236, 2011.

- [2] Do-Yun Kim, "Phase Current Sensing Method Using Three Shunt Resistor for Three Phase Inverter," *2011 Power Electronics Annual Conference*, pp. 235-236, 2011.
- [3] K.H Yeon, S.D Kim, D Son, "Current Sensor Based on Hall Sensor and Magnetic Core for Hybrid Vehicle," *ICAUMS2010 International Conference of Aums*, Dec. 5-8. 2010.
- [4] Hwa-gene Lee, Kwon Soo Han, Kyu- Tae Kim, "Precision evaluation of High DC current shunt," *2011 KIEE Annual Conference*, pp. 227-229, 2011.
- [5] K-T. Kim, "Precise Measurement of High Current Shunt Resistance," *2005 KIEE Annual Conference*, pp. 403-406, 2005.
- [6] Min-Ho Song, "Current Measure using Fiber-Optic CT," *KIIEE Annual Conference*, pp. 28-33, July 2004.
- [7] Ho-Gi Kim, Gu-Bae Kang, Dong-Jin Nam, "Coreless Hall Current Sensor for Automotive Inverters Decoupling Cross-coupled Field," *Journal of Power Electronics*, Vol. 9, No. 1, Jan. 2009.
- [8] E. R. Olson and R. D. Lorenz, "Effective use of minaiature, multi-point, field-base current sensors witout magnetic cores," in *Conf. Rec. IEEE-IAS Annu Meeting*, pp. 1426-1433, 2007.
- [9] Byung-Geuk Cho, Jung-Ik Ha, Seung-Ki Sul, "Voltage Injection Method for Boundary Expansion of Output Voltages in Three Shunt Sensing PWM Inverter," *IEEE ECCE*, pp. 411-415, 2011.
- [10] Jung-Ik Ha, "Voltage Injection Method for Three-Phase Current Reconstruction in PWM Inverters Using a Single Sensor," *IEEE Trans. Power Electronics*, Vol. 24, Issue. 3, pp. 767-775, Mar. 2009.
- [11] R. P. Singh and A. M. Khambadkone. "Giant Magneto Resistive(GMR) Effect Based Current Sensing Technique for Low Voltage/High Current Voltage Regulator Modules," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 23, pp. 915-925, Mar. 2008.
- [12] N. McNeill, G. Iordanidis, D. Holliday, and P. Mellor, "Low-cost high-bandwidth current transducer for automotive applications," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 21, pp. 832-835, Sep. 2006.
- [13] Ji-Hoon Jang, Seung-Ki Sul, Yo-Chan Son, "Current Measurement Issues in Sensorless Control Algorithm using High Frequency Signal Injection Method," *IEEE IAS Annual Meeting*, Vol. 2, pp. 1134-1141. 2003.
- [14] Bob Mammano, "Current Sensing Solutions for Power Supply Designers," 2001 Texas Instruments Incorporated document.
- [15] Texas Instruments "Understanding Data Converters," Application report, 1995.
- [16] Doo-Yong Jung, "Soft Switching Boost Converter using a Single Switch," *2009 Power Electronics Annual Conference*, pp. 211-219, 2009.
- [17] Jin-Bae Kim, "Soft Switching DC/DC Converter Using Boost," *2009 Power Electronics Annual Conference*, pp. 436-437, 2009.



### 김석희(金石熙)

1983년 4월 13일생. 2010년 숭실대 전기공학과 졸업. 2014년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2014년~현재 유라코퍼레이션 R&D센터 주임연구원.



### 최병민(崔炳敏)

1985년 2월 14일생. 2013년 숭실대 전기공학과 졸업. 2013년~현재 동 대학원 전력전자연구실 석사과정.



### 박종후(朴種厚)

1975년 8월 26일생. 1999년 서울대 공대 전기공학부 졸업. 2001년 동 대학원 전기공학부 졸업(석사). 2006년 동 대학원 전기컴퓨터공학부 졸업(공학박). 2004년~2005년 Virginia Tech(Visiting Scholar). 2006년~2007년 반도체공동연구소 선임연구원 및 연수연구원. 2007년~2009년 서울대 정보기술사업단 박사후 연구원. 2009년~현재 숭실대 전기공학부 조교수. 당 학회 JPE 편집위원.



### 전희종(田喜鍾)

1953년 1월 6일생. 1975년 숭실대 전기공학과 졸업. 1977년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1977년~1981년 공군사관학교 전자공학과 교수. 1987년 중앙대 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1995년~1996년 Univ. of Victoria CA. 객원교수. 1983년~현재 숭실대 전기공학과 교수.