

다상 동기 벡 컨버터의 Current Sensing 방법의 비교 연구

김정훈, 조경식, 임정규, 정세교
경상대학교 전기전자공학부

Comparative Study on Current Sensing Method of Multi-Phase Synchronous Buck Converter

Jeong-Hoon Kim, Kyung-Sig Cho, Jeong-Gyu Lim, Se-Kyo Chung
Gyeongsang National University

ABSTRACT

For the design of the voltage regulation module(VRM) having a high performance, current sensing is one of the most important functions. In this paper, three different methods for sensing the current in the multi-phase synchronous buck converter are analyzed considering the efficiency, accuracy and cost. The experiments are performed for the three current sensing methods to verify the theoretic analysis.

1. 서 론

마이크로프로세서 기술의 발전에 따른 집적도 향상으로 소자의 전원이 저 전압, 고 전류화 되고 있어 마이크로프로세서의 전원으로 저 전압, 고 전류의 빠른 동특성을 갖는 고성능의 Voltage regulation module(VRM)이 필요하게 되었다. 다상 동기 벡 컨버터(Multi-phase synchronous buck converter)는 이러한 특성에 적합하여 VRM 응용에 많이 사용되고 있다. 다상 동기 벡 컨버터는 컨버터의 용량확대 뿐만 아니라 Interleave 동작을 통해 전류와 전압리플을 감소시킬 수 있다는 장점이 있으며 이를 위해서는 정확한 스위칭 타이밍, 개별 컨버터의 부하 분담, 리플 감소를 위한 Interleave 구동 등이 매우 중요한 기술이다.^{[1]-[5]} 또한 다상 동기 벡 컨버터와 같은 대부분의 DC/DC 컨버터 시스템에서는 각각의 응용 분야에서 요구되는 성능을 위해 다양한 제어기법과 회로 보호기능 등이 적용되고 있으며, 이는 회로의 전류 신호에 대한 정확한 정보를 필요로 한다. 따라서 전류 검출 회로는 다상 동기 벡 컨버터의 제어와 회로 보호 기능에 필수적인 요소 중의 하나이다. 전류 검출 방법으로는 비교적 가장 단순한 Output current sensing resistor 방법을 비롯하여, inductor current sensing, input current sensing resistor 등의 다양한 방법들이 사용되고 있다. 이러한 방법들은 효율, 정확도, 비용 등의 측면에서 각각의 장단점을 가지고 있으며, 적절한 trade-off를 통해 각 응용 분야에 적용되고 있다.

본 논문에서는 고성능 마이크로프로세서의 전원으로 사용되는 다상 동기 벡 컨버터의 특성을 고려하여 다양한 전류 검출 방법들에 대한 분석과 실험을 수행하였다. 이러한 분석 결과는 향후 다상 동기 벡 컨버터를 이용한 전원 시스템 설계 시 유용한 자료로 활용될 수 있을 것이다.

2. 시스템의 구성

그림 1은 본 논문에서 사용된 다상 동기 벡 컨버터의 디지털 제어 시스템 구성을 나타내고 있다. 전체 시스템은 4개의 동기 벡 컨버터를 병렬 연결하여 구성된 전력단과 TMS320F2812 digital signal processor (DSP)를 이용한 제어기, 각 상의 전류 검출을 위한 전류 검출 회로, 검출된 전류 신호를 적절한 필터링과 ADC 입력 범위에 맞게 신호의 크기를 조절하기 위한 signal conditioning circuit 등으로 구성되어 있다.

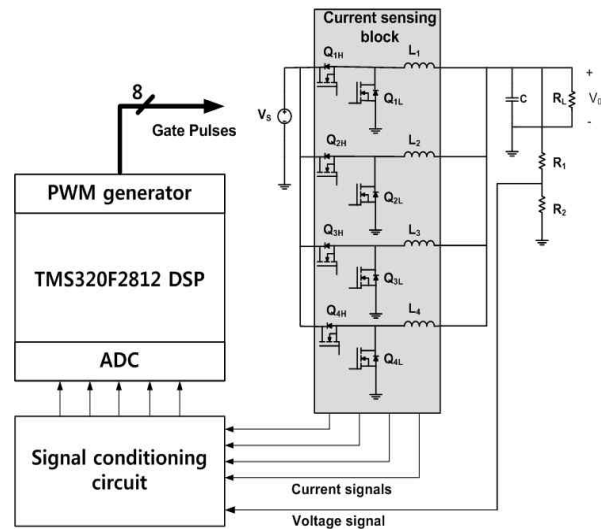


그림 1 다상 동기 벡 컨버터의 시스템 구성
Fig. 1 System configuration of multi-phase synchronous buck converter

3. Current Sensing 방법

본 논문에서 분석한 전류 검출 방법으로는 Output current sensing resistor, inductor current sensing, input current sensing resistor를 이용한 검출 방법이 있다. 이러한 검출 방법은 실험을 통하여 정확도와 효율등과 관련하여 분석 하였다. 각각의 전류 검출 방법의 분석은 그림 1의 시스템을 이용하였으며, 병렬로 연결된 각각의 컨버터는 동일한 조건을 가지고 설계되었으므로 한 상의 동기 벡 컨버터만을 이용하여 실험을 수행하였다. 다상 동기 벡 컨버터 시스템의 사양은 표1과 같다.

signal conditioning circuit은 Analog device사의 MAX4172를 이용하여 구성하였으며 검출된 전류신호를 10배 증폭하여 DSP의 ADC에 입력된다.

표 1 다상 동기 벽 컨버터의 사양
Table 1 Parameters of multi-phase synchronous buck converter

Parameter	Symbol	Value	Unit
Input voltage	V_{in}	12	V
Output voltage	V_o	1.5	V
Filter capacitance	C	440	μF
Filter inductance	L_l	4.2	μH
Switching frequency	f_s	100	kHz

3.1 Output Current Sense Resistor

전류 검출 방법 중 가장 대표적인 방법으로 그림 2에서와 같이 인덕터와 직렬로 sense resistor를 연결하여 전류 신호를 검출한다.

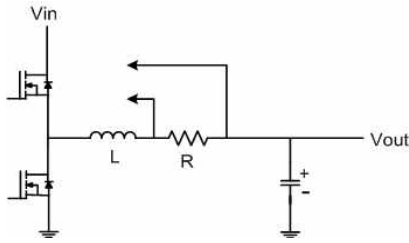


그림 2 Output current sense resistor를 이용한 방법
Fig. 2 Output current sense resistor method

이 방법은 가장 단순한 방법으로 구현이 쉽다는 장점이 있으나 sense resistor에서의 전력 소모로 인하여 전체 시스템의 효율을 감소시킨다.

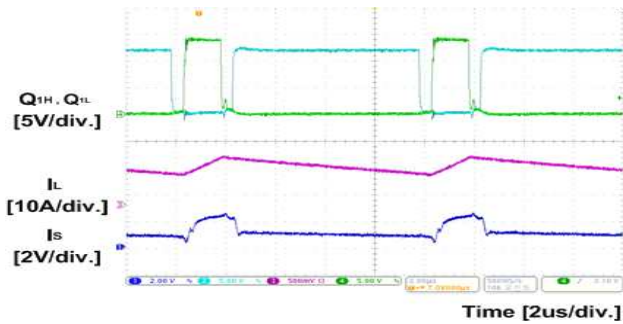


그림 3 Output Current Sense Resistor 방법의 실험 파형
Fig. 3 Experimental results using output current sense resistor

그림 3은 Output Current Sense Resistor 방법을 이용하여 실험을 수행한 결과 파형이며, I_L 은 인덕터 전류, I_S 는 검출된 전류 신호를 나타내었다. 실험결과 10%의 효율 손실이 나타났다. 정확도는 sense resistor내부 허용 오차와 동일하며 99%의 정확도를 나타낸다.

3.2 Inductor Current Sensing

Output current sensing resistor방법과 비슷하며 인덕터의 직렬 등가 저항 R_L 을 이용한 방법이다. 직렬 등가

저항 R_L 이 인덕터 전류 검출을 위한 저항 역할을 한다. 인덕터와 병렬로 연결된 R_S 와 C_S 값을 고려하여 C_S 양단전압을 측정하여 인덕터 전류를 검출하는 방법이다. 그림 4는 Inductor Current Sensing 방법을 나타내고 있다.^[7]

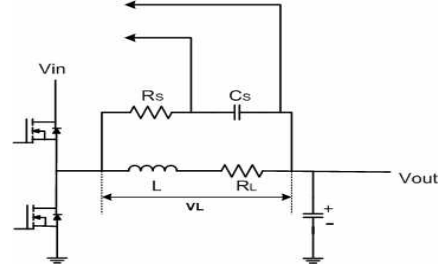


그림 4 Inductor current sensing을 이용한 방법
Fig. 4 Inductor current sensing method

인덕터 양단 전압 V_L 은 다음과 같다.

$$V_L = (R_L + sL)I_L \quad (1)$$

커패시터 C_S 의 양단 전압은 아래식과 같다.

$$V_C = \frac{1}{sC} V_L = \frac{V_L}{1 + sR_S C_S} = \frac{(R_L + sL)I_L}{1 + sR_S C_S}$$

$$= R_L \left(\frac{1 + s \left(\frac{L}{R_L} \right)}{1 + sR_S C_S} \right) I_L = R_L \left(\frac{1 + s\tau_L}{1 + s\tau_S} \right) I_L \quad (2)$$

여기서 $\tau_L = \frac{L}{R_L}$, $\tau_S = R_S C_S$ 이다.

식 (2)에서 알 수 있듯이 $\tau_L = \tau_S$ 이면, 커패시터 양단 전압 V_C 과 인덕터 전류의 비는 인덕터의 등가 직렬 저항 R_L 만을 이용하여 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_C = R_L I_L \quad (3)$$

따라서 인덕터의 전류는 R_L 값을 얻을 수 있다면 식 (3)를 이용하여 추정할 수 있다. $\tau_L = \tau_S$ 의 조건을 이용하여 C_S 와 R_S 의 값은 설계자가 적절한 값을 고려하여 구할 수 있다. 그림 5는 같은 전압이 인가될 때 인덕터 전류와 커패시터 전류를 나타내고 있다.

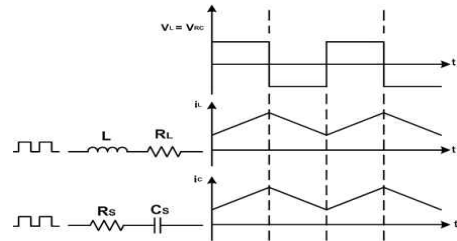


그림 5 인덕터 전류와 커패시터 전류
Fig. 5 Inductor current and capacitor current

이 방법은 외부의 sense resistor가 없어 추가적인 손실이 없다는 장점이 있다. 그러나 식 (4)에서 알 수 있듯이 시상수 τ_L 과 τ_S 의 정확한 매칭이 이루어져야 하지만, 각 소자의 파라미터 오차와 온도에 따른 파라미터 변동으로 매칭이 어려워 정확도가 떨어진다는 단점이 있다.

그림 6은 Inductor Current Sensing 방법을 이용하여

실험을 수행한 결과 파형이며, I_L 은 인덕터 전류, I_S 는 검출된 전류 신호를 나타내었다. 여기서, 각 소자의 파라미터는 $L=4.2[\mu\text{F}]$, $R_L=60[\text{m}\Omega]$, $C_S=0.22[\mu\text{F}]$, $R_S=318[\Omega]$ 이다. 이 방법에서 추가적인 회로 손실은 없으며, 정확도는 92.6%로 나타났다. 이러한 측정 오차는 사용된 소자의 파라미터 오차에 기인하는 것이다.

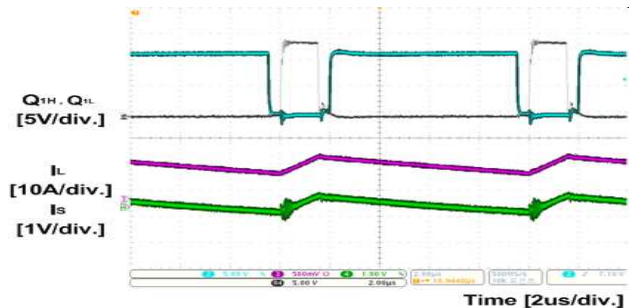


그림 6 Inductor Current Sensing 방법의 실험 파형
Fig. 6 Experimental results using inductor current sensing

3.3 Input Current Sensing Resistor

다상 동기 벽 컨버터의 입력측에 Sense Resistor를 직렬로 연결 한 것으로 정확도는 Input Current Sense Resistor 방법과 마찬가지로 Sense Resistor내부 허용 오차에 따라 결정된다. 다상 동기 벽 컨버터의 입력 전류가 출력전류보다 낮기 때문에 전력손실은 Output Current Sense Resistor 방법보다 낮게 나타난다.^[7] 그림 7은 Input Current Sensing Resistor 방법을 나타내고 있다.

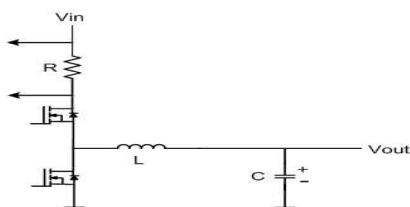


그림 7 Input Current Sensing Resistor를 이용한 방법
Fig. 7 Current sensing method using input current sensing resistor

그림 8은 Input Current Sensing Resistor 방법을 이용하여 실험을 수행한 결과 파형이며, I_L 은 인덕터 전류, I_S 는 검출된 전류 신호를 나타내었다. 실험결과 5.6%의 효율 손실이 나타났다. 정확도는 sense resistor내부 허용 오차로 나타내며 99%의 정확도를 나타내었다.

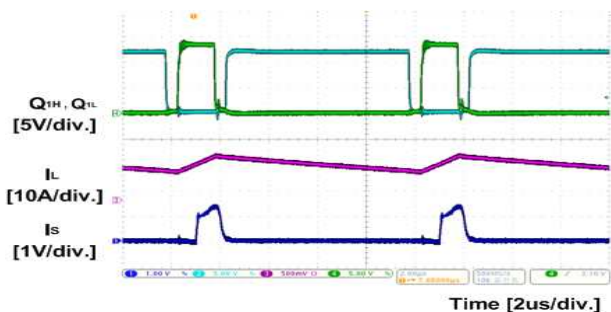


그림 8 Input Current Sense Resistor 방법의 실험 파형
Fig. 8 Experimental results using input current sense resistor

4. 결론

본 논문에서는 DSP를 이용한 다상 동기 벽 컨버터를 구현하였으며 4상 동기 벽 컨버터에 대하여 3가지 전류 검출 방법에 대한 정확도와 컨버터의 효율 등을 실험적으로 분석 하였으며 표 2에 그 결과를 요약하였다. 실험 결과 Output Current Sensing Resistor 와 Input Current Sensing Resistor의 정확도는 sense resistor의 내부 허용오차에 따라 차이가 나며 효율 손실은 각각 10%, 5.6%의 결과를 보였다. Inductor Current Sensing 방법은 시상수 τ_L 과 τ_S 의 값에 따라 측정 오차가 결정되며 이 방법에서는 추가적인 전력 손실은 없다. 이와 같은 분석 결과는 향후 VRM 설계에 있어 유용한 자료로 활용될 수 있을 것이다.

표 2 다양한 전류 검출 방법의 결과 비교

Table 2 Power loss and accuracy of various current sensing methods

전류 검출 방법	정확도	손실
Output Current Sensing Resistor	99%	10%
Inductor Current Sensing	92.6%	0
Input Current Sensing Resistor	99%	5.6%

참고 문헌

- [1] S. K. Mazumder and S. L. Kamisetty, "Design and experimental validation of a multiphase VRM controller", IEE Proc. Electric Power Appl., vol. 152, no. 5, pp. 1076-1084, 2005.
- [2] N. Berbel, J. M. Guerrero, J. Cruz, J. Miret, and M. Castilla, "One-cycle control for the parallel operation of synchronous buck converters", Conf. Rec. IEEE ISIE2005, pp. 795-798, 2005.
- [3] W. Huang, "The design of a high-frequency multiphase voltage regulator with adaptive voltage positioning and all ceramic capacitors", Conf. Rec. IEEE APEC2005, pp. 270-275, 2005.
- [4] W. Huang, G. Schuellein, and D. Clavette, "A scalable multiphase buck converter with average current share bus", Conf. Rec. IEEE APEC2003, pp. 438-443, 2003.
- [5] W. Huang, "A new control for multi-phase buck converter with fast transient response", Conf. Rec. IEEE APEC2001, pp. 273-279, 2001.
- [6] Garcea, G.; Saggini, S.; Zambotti, D.; Ghioni, M.; "Digital auto-tuning system for inductor current sensing in VRM applications" Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2006. APEC '06. Twenty-First Annual IEEE 19-23 March 2006 Page(s):6 pp.
- [7] Ron Lenk, Principal Applications Engineer "Optimum Current Sensing Techniques in CPU Converters" Application Bulletin AB-20
- [8] Garinto, D, Indonesia Power Electronics Center, Surakarta, Indonesia "New Converter Architectures with Multi-interleaving Technique for Future Microprocessors" Telecommunications Energy Conference, 2006. INTELEC '06. 28th Annual International Publication Date: Sept. 2006, On page(s): 1-7