

DC-DC 컨버터에서 Duty Feedback 을 이용한 새로운 센서리스 제어 기법

노형주*, 이동윤, 현동석
한양대학교 전기공학과

A New Sensorless Control Scheme Using Simple Duty Feedback Technique in DC-DC Converters

Hyeong-Ju Noh*, Dong-Yun Lee, and Dong-Seok Hyun
Dept. of Electrical Eng. Hanyang Univ.

ABSTRACT

This paper presents a new sensorless control scheme using simple duty signal feedback technique in DC-DC converters. The proposed sensorless control scheme (DFC) has the characteristics that they show the same as operation performance of current mode control by using duty feedback technique without current sensor as well as present better dynamic response performance than conventional sensorless current mode control (SCM) in case that input source is perturbed by step change or DC input source includes the harmonics. Also, the proposed control scheme has good noise immunity and simple control circuits since they have one feedback loop, and can be applied to all DC-DC converters. The concept and control principles of the proposed control scheme are explained in detail and the validity of the proposed control scheme is verified through several interesting simulated results.

1. 서 론

일반적으로 전력변환기의 제어는 제어대상을 피드백 하므로써 발생되는 노이즈에 대해 강인해야 되고 제어회로 설계가 간단해야 하며, 또한 우수한 과도상태 특성을 갖는 것이 바람직하다. 따라서 최근 이러한 특성들을 개선하기 위한 연구가 활발히 이루어지고 있다 [1]-[6].

이중에서, 기존의 전압제어 기법에서는 드티비가 전압제어 루프의 오차신호를 감소시키기 위해 선형적으로 modulation 된다. 이 제어방법은 한 개의 피드백 루프만을 갖기 때문에 단순한 제어회로를 구성하며 비교적 노이즈에 대해 강한특성을 갖는다. 그러나 만약, 전원측에 전원변동이 발생한 경우, 출력전압이 바뀐다음 드티비가 새로운 값으로 바뀌게 되므로 과도기 응답성능이 현저히 저하되며 이로 인해 출력전압에 상당한 과도기 오차가 나타나게 되는 심각한 문제점을 가지고 있다.

이러한 문제점을 해결하기 위해 최근 전류제어 루프를 포함한 전류제어 기법들이 많이 연구되어지고 있다 [2].

그 중 대표적인 전류 제어기법에는 피크전류 제어기법과 평균전류 제어기법이 있다. 이 제어방식에서 스위치는 일정주파수 클럭 신호에 의해 터-온 된다. 먼저 피크

전류 제어방식에서는 스위치전류가 오차 신호에 도달할 때, 그리고 평균전류 제어방식에서는 평균전류가 삼각파 신호와 교차할 때 스위치가 터-오프 된다. 이 두 가지 제어기법은 피드백 하는 전류에 입력전원의 정보가 포함되어있기 때문에, 입력 전원측에 전원변동이 발생한 경우, 과도기 응답성능은 기존의 전압제어방식 보다 훨씬 개선된 특징을 갖는다 [1]-[2]. 하지만 PWM 비교기의 두 입력파형의 기울기가 서로 부적절한 관계를 이루게 되면 출력전압의 파형에 진동(oscillation)이 발생되어 제어가 불안정하게 된다. 따라서 이를 해결하기 위해 인위적인 기울기 보상을 필요로 한다. 또한 전류센서 이용에 따른 부가적인 비용, 두 개의 피드백 루프에 따른 제어회로의 복잡성, 스위치 온-오프시 발생되는 노이즈 스파이크에 대단히 취약한 단점들을 가지고 있다.

최근에는 센서리스 전류 제어 기법이 활발히 연구되어지고 있다 [3]-[6]. 이러한 센서리스 전류 제어 기법은 보통 관측기를 근간으로 하는 기법(an observer-based technique)을 이용하여 평균전류를 관측하고 이 관측된 전류신호가 삼각파 신호와 교차하게 되면 스위치가 터-오프 되는 방식이다. 이 제어기법은 전류센서를 사용하지 않고서도 전류제어방식과 동일한 동작특성을 보이며 또한, 실제 신호가 아닌 관측된 전류신호를 이용하므로 노이즈 특성이 우수하다. 하지만 입력 전원측에 전원변동이 발생하거나 직류 입력전원에 고조파성분이 포함된 경우 적분기의 적분시간 지연에 의해 한 주기이내에 순시 과도기 제어가 이루어지지 않으므로 출력전압의 파형에 전형적인 과도기 오차가 발생되어 과도기 응답성능이 저하되는 문제점이 있다.

이러한 문제점을 해결하기 위해 본 논문에는 새로운 제어기법인 드티 피드백 기법을 제안하고자 한다. 제안한 기법은 기존의 센서리스 전류 제어기법이 가지고 있었던 장점을 뿐만 아니라 입력 전원측에 스텝 천이에 의한 전원변동이 발생하거나 직류 입력전원에 고조파성분이 포함된 경우 기존 제어 방식들 보다 훨씬 빠른 과도기 응답성능을 보인다. 또한 본 제어 기법은 전류센서를 이용하지 않기 때문에 비용 저감 효과가 있고 단일 루프제어에 따른 비교적 간단한 제어회로로 구성되며 모든 DC/DC 컨버터들에 적용 가능하다.

본 논문에 제안된 새로운 제어기법인 드티 피드백 기법의 개념 및 제어원리를 자세히 설명하며 시뮬레이션 결과를 통하여 제안한 제어기법의 타당성을 검증하고자 한다.

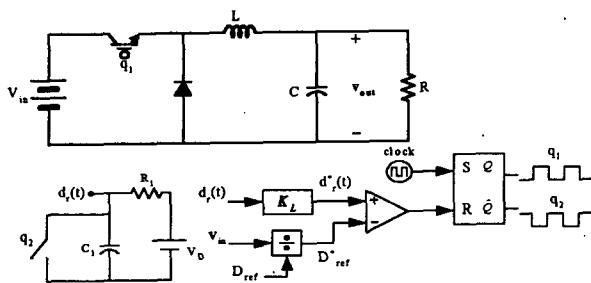


그림 1 둑티 피드백 제어가 적용된 강압 컨버터 모델
Fig. 1 Sample buck converter and overall block diagram

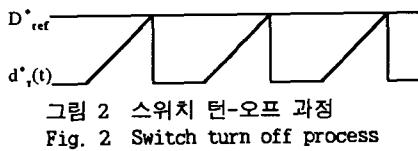


그림 3 입력전원 가변시 새로운 기준듀티 생성과정
Fig. 3 The producing principle of Dref according to the input variation

2. 둑티 피드백을 이용한 새로운 센서리스 제어기법 (Duty Feedback Control - DFC)

2.1 제안한 제어기법의 개념

그림 1은 강압 변환기와 둑티 피드백을 이용한 새로운 센서리스 제어를 위한 블럭도를 나타내고 있다. 이 블럭도는 입력변화에 대해 신속한 제어를 수행하도록 하기 위한 입력 피드백 부분과 실시간 적으로 변화하는 둑티를 피드백 하기 위한 둑티 피드백 부분으로 구성되어 있다.

그 중에서 입력 정보를 포함하고 있는 제어부는 입력 전압의 변화에 따라 출력전압을 관측하기 위한 부분이다. 여기서 D_{ref} 는 제어하고자 하는 시스템의 출력전압을 의미하는 기준 둑티이며 제산기의 두 입력 신호인 피드백된 입력(V_{in})과 기준 둑티(D_{ref})에 의해 새로운 기준 둑티 D^*_{ref} 가 발생된다. 따라서 제안한 센서리스 제어는 시스템의 입력 변화에 대하여 새로 형성된 기준 둑티 D^*_{ref} 에 의해 제어를 수행하게 된다. 또한 다른 제어부는 실제 시스템에 인가되어지는 둑티값을 측정하여 이것을 기울기를 갖는 실시간 함수로 나타내기 위해 스위치 q_2 를 사용하여 램프 함수로써의 둑티 함수 $d_r(t)$ 를 발생시킨다. 이 $d_r(t)$ 는 다시 선형화 이득 K_L 에 의해 RC회로의 지수 함수적인 특성이 제거되고 선형적인 특성을 갖는 $d^*_r(t)$ 로 바뀌게 된다. 그리고 각각의 제어부에서 얻어진 값들이 비교기의 입력으로 사용되어 제안한 센서리스 제어를 수행하게 된다.

2.2 새로운 센서리스 제어기법의 동작원리

본 논문에서 제안한 제어기법(DFC)의 동작원리는 다음과 같다.

먼저, 스위치는 일정주파수 클럭 신호에 의해 터-온되고, 스위치의 터-오프는 그림 2에서 보여지는 바와 같이 실시간에서 램프함수로 나타낸 둑티 신호 $d^*_r(t)$ 가 변경된 기준 둑티 D^*_{ref} 에 도달하는 순간 레ച(latch)의 리셋 신호에 의해 이루어진다.

그림 3은 입력 전원측에 변동이 발생한 경우, 강압 컨

버터에서 기존의 D^*_{ref} 를 제산기에 의해 새로 변경된 D^*_{ref} 로 변환시켜주는 모델을 나타내고 있다. 강압 컨버터에서, 입력이 V_1 에서 V_2 로 바뀌게 되면, 입력전압과 D_{ref} 의 관계에 의해 기존의 D^*_{ref} 를 새로운 D^*_{ref} 로 변화시켜 컨버터의 출력전압을 일정하게 제어하게 된다. 따라서 각각은 다음 식과 같다.

$$V_{out} = D^*_{ref1} V_1 = D^*_{ref2} V_2 \quad (1)$$

여기서, D^*_{ref1} : 변경전 D^*_{ref} , D^*_{ref2} : 변경후 D^*_{ref} 를 나타낸다.

$$D^*_{ref} = \frac{D_{ref}}{V_{in}} \quad (2)$$

또한, 입력 전원측에 고조파 성분이 포함된 경우, 식(2)에 의해 기존의 D^*_{ref} 가 한 주기 이내에 새로운 D^*_{ref} 로 바뀌게 된다. 따라서 어떠한 입력전원의 변동에 대해서도 한 주기 이내에 스위칭 컨버터의 신속한 제어가 이루어지게 되므로 과도기 응답성능이 매우 우수하다. 또 다른 제어부인 둑티 피드백 회로에서는, 실제로 피드백한 둑티값이 high 아니면 low signal로 나타나므로 이것을 가지고서는 비교기에서 D^*_{ref} 와 정확한 비교를 할 수 없다. 따라서 이 피드백된 시그널이 비교기에서 D^*_{ref} 와 비교가 이루어 질 수 있도록 하기 위해 둑티값의 크기를 그림 1에서 보여지고 있는 둑티 피드백 제어부에 의해 이를 실시간에서 램프 함수로 바꿔 준다.

이때 둑티 피드백 제어부의 $d_r(t)$ 은 식 (3)과 같다.

$$d_r(t) = q_2 V_D \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}}\right) \quad (3)$$

여기서, q_2 : 스위치 오프시 1이 되는 스위칭 함수.

식 (3)으로부터 알 수 있듯이 지수 함수적인 특성을 갖는 $d_r(t)$ 을 직접 비교기에 인가 할 경우 필요로 하는 둑티 신호보다 더 많은 시간동안 둑티 신호가 발생되므로 컨버터의 출력전압에 정상상태 오차가 발생된다. 따라서 $d_r(t)$ 의 출력중 가능한 한 선형적인 부분만을 사용해야 한다. 하지만 이 선형적인 부분의 값은 필요로 하는 값보다 작기 때문에 이 값을 선형적으로 확대시키기 위해 선형화 이득 K_L 를 통하여 새로운 $d^*_r(t)$ 를 생성한다. 이로인해 거의 정확한 둑티 피드백을 이용할 수 있으며 이 값은 실제 스위칭 둑티와 유사하다.

표 1은 기본적인 DC/DC 컨버터와 절연형 컨버터에 본 제어원리를 적용시킨 경우 생성된 변경된 기준 둑티 D^*_{ref} 를 나타낸다. 또한 그림 4(a)-(d)은 승압, 승·강압, 폴라이액, 포워드 컨버터 모델과 표 1에서 보여지고 있는 새로운 D^*_{ref} 를 바탕으로 하는 둑티 피드백 제어루프의 블록도를 보여주고 있다. 이로부터 본 논문에 나타낸 둑티 피드백을 이용한 새로운 센서리스 제어(DFC)가 모든 DC/DC 컨버터에 적용될 수 있음을 알 수 있다.

3. 시뮬레이션 결과

본 논문에서 제안한 둑티 피드백 제어(DFC)의 타당성을 검증하기 위해 시뮬레이션을 수행하였다. 또한 제안한 방법이 기존의 센서리스 전류제어(SCM)보다 성능이 우수함을 보이기 위해 동일한 동작조건 하에서 기존의 센서리스 제어를 하는 강압 컨버터와 새로운 둑티 피드백 제어를 하는 강압 컨버터의 동작성능을 비교하였다. 시스템 파라미터들은 다음과 같이 선택되었다. 스위칭 주파수 $f_s=100kHz$, 필터 인덕턴스 $L=7uH$, 필터 커페시턴스 $C=660uF$, 부하저항 $R=0.4\Omega$, 출력전압 $V_o=4.8V$, 출력 $P_o=60W$ 등이다.

입력 전원측에 다음과 같은 스텝 천이에 의해 전원변동

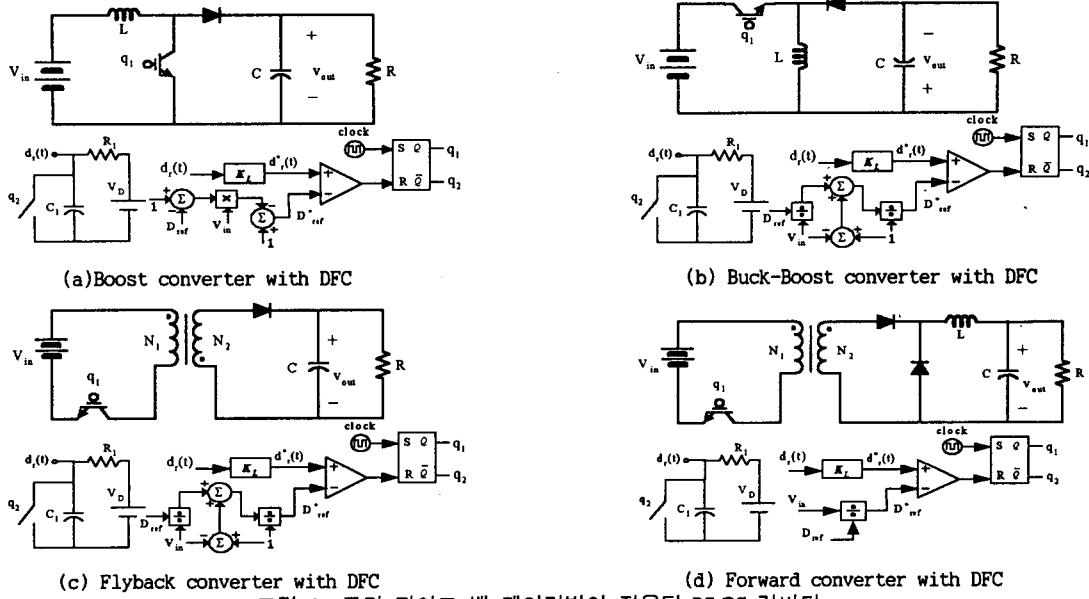


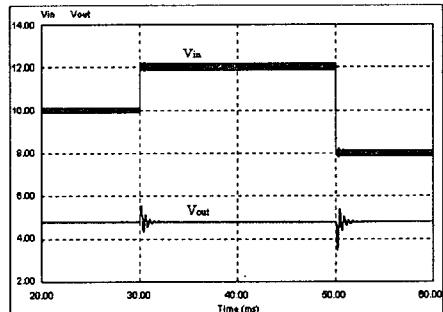
그림 4 듀티 피이드-백 제어기법이 적용된 DC/DC 컨버터

Fig. 4 Model of DC/DC converters with DFC

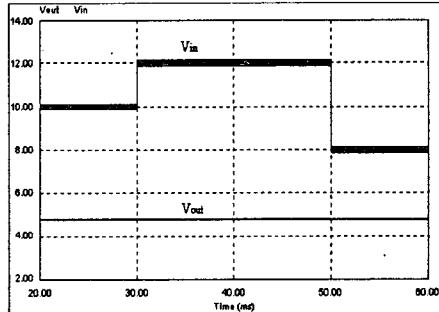
표 1 새로운 DFC를 갖는 컨버터들의 D^* 계산식

컨버터 유형	변경된 기준 듀티 D^*_{ref}
강압 컨버터	D_{ref} / V_{in}
승압 컨버터	$1 - (1 - D_{ref})V_{in}$
승강압 컨버터	$1 / ((1 - V_{in}) + (V_{in} / D_{ref}))$
포워드 컨버터	D_{ref} / V_{in}
플라이백 컨버터	$1 / ((1 - V_{in}) + (V_{in} / D_{ref}))$

이 발생되었다. $t=30\text{ms}$ 에서 입력전압 V_{in} 이 10V에서 12V로, $t=50\text{ms}$ 에서 입력전압 V_{in} 이 12V에서 8V로 변경된 경우, 그림 5(a)는 기존의 센서리스 제어를 하는 강압 컨버터의 출력전압을, 그림 5(b)는 제안한 듀티 피드백 제어를 하는 강압 컨버터의 출력전압을 나타낸다. 그림 6(a)와(b)는 입력 전원측에 고조파성분이 포함된 경우 기존의 SCM 제어와 DFC 제어를 하는 강압 컨버터의 출력전압을 나타낸다.



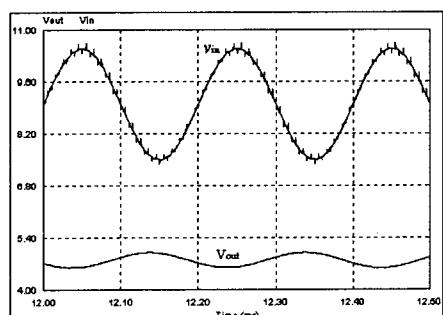
(a) The output voltage of conventional SCM



(b) The output voltage of proposed DFC

그림 5 입력전원이 스텝천이에 의해 변동된 경우 SCM 및 DFC제어를 하는 경우 각각의 출력전압

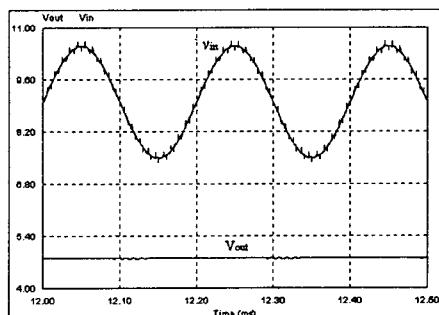
Fig. 5 The output voltage of a buck converter with SCM and that of a buck converter with DFC



(a) The output voltage of a buck converter with SCM

그림 6 입력전원에 고조파 성분이 포함된 경우 SCM 및 DFC제어를 하는 경우 각각의 출력전압

Fig. 6 The output voltage of a buck converter with SCM and DFC when input source has the harmonic components



(b) The output voltage of a buck converter with DFC

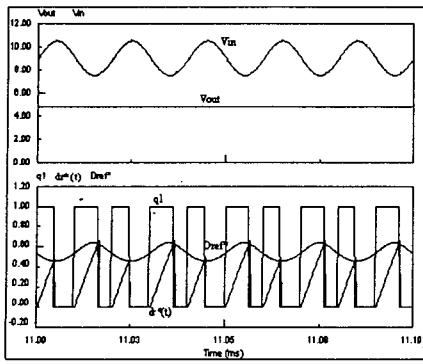


그림 7 한 스위칭 주기에서의 스위칭 과정
Fig. 7 The switching process in one switching cycle

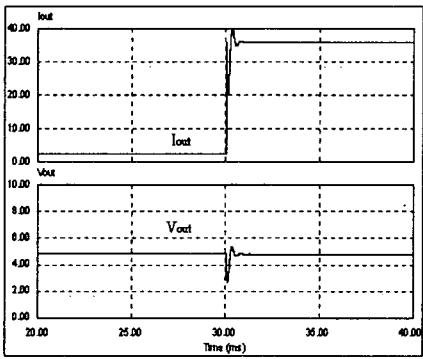


그림 8 부하 가변시 DFC 제어를 하는 강압 컨버터의 출력전류 및 전압
Fig. 8 The output current and voltage of a buck converter with DFC when load is changed

그림 7은 입력전원에 50kHz의 리플성분, 즉 고조파 성분이 포함된 경우, 본 논문에 제안한 듀티 피드백 기법은 식 (2)에 의해 기존의 D^* _{ref}가 새로운 기준듀티 D^* _{ref}로 변경되며, 이 변경된 기준듀티 D^* _{ref}가 선형화된 듀티 함수 $d^*(t)$ 와 만나게 될 때 스위치가 턠-오프 되는 과정이 단지 한 주기 이내에 완료됨을 보여주고 있다. 따라서 본 제어기법이 적용된 시스템의 출력전압 과형에는 어떠한 과도기 오차도 발생되지 않음을 확인 할 수 있다. 따라서 그림 5와 6으로부터, 본 논문에 제안한 듀티 피드백 제어가 기존의 센서리스 전류제어 보다 입력전압 변동에 대해 훨씬 빠른 과도기 응답성을 보임을 알 수 있다.

그림 8은 부하가 $t=30\text{ms}$ 에서 6%에서 100%로 변경된 경우 DFC 제어를 하는 강압 컨버터의 출력전압 및 출력전류의 과형을 나타낸다.

그림 8로부터, 부하가 변화 된다 할지라도 제안한 제어기법은 출력전압이 정확히 제어되고 있음을 알 수 있다.

그림 9는 $t=30\text{ms}$ 에서, 입력전압 V_{in} 이 5V에서 6V로, $t=50\text{ms}$ 에서, 입력전압 V_{in} 이 6V에서 4V로 변경된 경우 제안한 DFC제어를 하는 포워드 컨버터의 출력전압 과형을 보여주고 있다. 이때, 변압기의 권선비, $n(n_s/n_p)=2$ 이다. 그림 9로부터 알 수 있듯이 제안한 새로운 센서리스 제어기법은 모든 DC/DC 컨버터 시스템에 적용 가능함을 알 수 있다.

4. 결 과

본 논문에서는 DC/DC 컨버터에서 듀티 피드백을 이용한 새로운 제어기법을 다루고 있다.

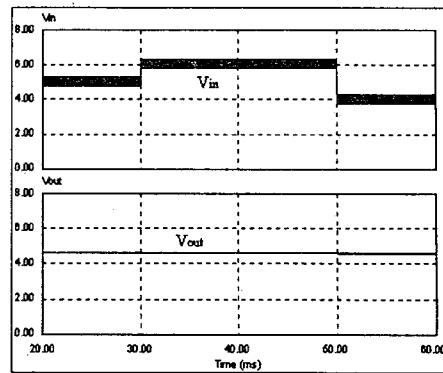


그림 9 새로운 DFC를 갖는 포워드 컨버터의 출력전압
Fig. 9 The output voltage of a forward converter with DFC

제안한 제어기법의 동작원리 및 출력특성들이 상세하게 설명되었고 이 새로운 제어기법의 여러 가지 특성들이 시뮬레이션을 통해 검증 되었다. 제안한 제어기법은 다음과 같은 장점들을 가지고 있다.

- ▶ 한 개의 피드백 루프 시스템 구성으로 인한 단순한 구조
- ▶ 입력 전원에 변동이 발생하거나 입력 전원측에 고조파 성분이 포함된 경우, 제안한 제어기법인 DFC는 스위칭 컨버터의 강인한 제어가 가능 하므로 기존의 센서리스 전류 제어기법(SCM) 보다 훨씬 빠른 과도기 응답성을 제공.
- ▶ 센서리스 제어의 일종이므로 우수한 노이즈 특성.
- ▶ 전류센서 제거로 인한 저가 시스템 구현.

참 고 문 현

- [1] Lloyd Dixon., "Average current mode control of switching power supplies", Unitrode. Application note., U-140, 1999.
- [2] R.Mammano., "Switching power supply topology voltage mode vs. current mode", Unitrode. Design note., DN-62, 1999.
- [3] K.M.Smedley and S.C'uk., "One-cycle control of switching converters", IEEE Trans. Power Electron., Vol. 10, pp. 625~633, Nov. 1995.
- [4] K.M.Smedley and S.C'uk., "Dynamics of one cycle controlled Cuk converters", IEEE Trans. Power Electron., Vol. 10, pp. 634~639, Nov. 1995.
- [5] P.Midya and P.T.Krein., "Noise properties of pulse-width modulated power converters: open-loop effects", IEEE Trans. Power Electronics., Vol. 15, pp. 1134~1143, Nov. 2000.
- [6] P.Midya, P.T.Krein, and M.F.Greuel., "Sensorless current mode control-an observer-based technique for DC-DC converters", IEEE Trans. Power Electronics, Vol. 16, pp. 522~526, July 2001.