

2상 인터리브드 컨버터의 불평형 전류 문제를 해결을 위한 단일 전류 센서 기반 제어 기법

조영찬, 신덕식
전자부품연구원

Design Method Solving Unbalanced Current Problem with Single Current Sensor for 2-Phase Interleaved Converters

Young-Chan Cho, Duck-Shick Shin
Korea Electronics Technology Institute

ABSTRACT

2상 인터리브드 기법은 DC-DC컨버터의 스위칭 주파수의 2배의 효과를 얻을 수 있어 전류 리플 감소와 효율 향상을 위해 널리 쓰이는 방법이다. 하지만, 인덕터 및 스위치 등의 물리적인 편차와 방열 성능차이 등으로 인한 상간의 전류 불평형 문제로 하나의 상에 스트레스가 집중되어 내구성이 저하되고 수명감소로 이어지는 단점이 있다. 본 논문에서는 인터리빙 기법에서 발생하는 전류 불평형 문제를 단일 센서를 사용한 제어기법으로 해결하고 그에 대한 타당성을 시뮬레이션을 통하여 검증하였다.

1. 서론

최근 다양한 응용분야에서 쓰이는 DC-DC컨버터는 전류 분배와 스위칭 주파수의 상승효과를 얻을 수 있는 인터리브드 컨버터 방식이 사용되고 있다. 인터리브드 DC-DC컨버터는 각 상전류의 위상을 조절하여 전류 리플을 줄일 수 있고 단일 인덕터 설계와 비교하여 상대적으로 작은 사이즈로 인덕터의 설계가 가능하며 스위치의 방열 또한 효과적으로 할 수 있는 장점을 가지고 있다. 하지만, 인덕터, 스위치 소자, 상간의 임피던스 차이 등으로 인한 상간의 전류가 불균형이 발생하는 문제점을 갖고 있다. 장시간 동작 시 상대적으로 높은 전류가 인가되는 상에서 열이 발생하고 전류 불균형이 더욱 심화 되어 컨버터의 성능 및 품질 저하로 이어지는 위험성을 가진다. 이러한 상간의 불평형 전류의 문제를 해결하기 위하여 많은 연구들이 진행 되었지만 주로 전류센서를 상마다 측정하여 해결하고 하는 방식이 대부분이었다^[1]. 본 논문에서는 단일 센서만으로 상의 전류 불평형 문제를 효과적으로 해결하는 기법을 제시하였다. 2상 인터리브드 벡-컨버터의 연속도통모드 조건하에 불평형 제어기의 모델링 및 제어기 설계에 대해 서술하고 기법의 타당성은 시뮬레이션을 통하여 검증 하였다.

2. 2상 인터리브드 벡-컨버터의 불평형 전류 제어 기법 설계

2.1 2상 인터리브드 벡 컨버터의 모드 분석과 전류 센싱 기법

2상 인터리브드 벡 컨버터는 그림1과 같이 스위칭 동작에 따라 총 4가지 경우로 나눌 수 있다. 또한, 제어신호의 시비율

의 크기가 50%이하 시비율 조건(V_{con1}, V_{con2})과 50%이상 시비율 조건(V'_{con1}, V'_{con2})을 나누어 그림2와 같이 스위칭 동작에 대해 분석 가능하다. 두 조건 모두 각 업다운 카운터 피크 지점에서 모드2와 모드3으로 일정하고 양옆의 모드가 바뀔을 알 수 있다. 주목할 점은 모드2와 모드3은 입력 전원 부에 한상의 인덕터 전류만 흐르므로 만약 업다운 카운터 피크지점에서 입력 전원 부의 전류를 측정 하면 한상의 평균전류를 각각 측정할 수 있다는 점이다. 이점을 착안하여 본 논문에서는 전류센서를 입력전원 쪽에 배치하여 각 업다운 카운터의 피크지점에서 각 상의 전류를 센싱 하였다.

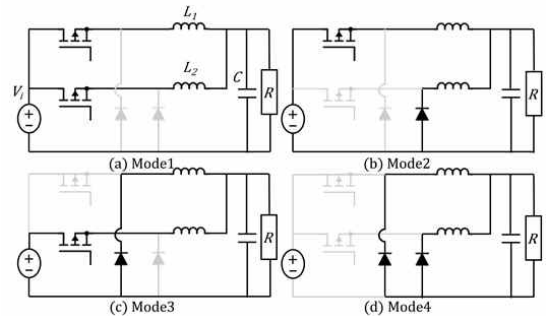


그림 1 2상 인터리브드 벡-컨버터의 4가지 모드
Fig. 1 4 Mode for 2 phase interleaved buck-converter

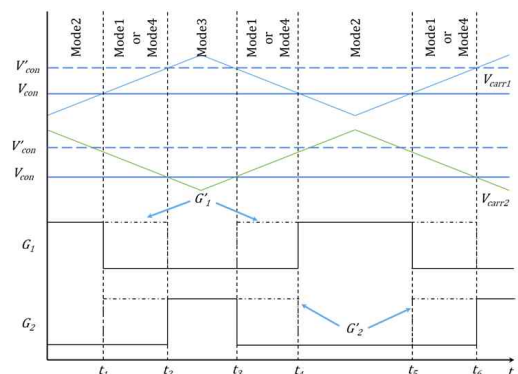


그림 2 두 가지 시비율 종류에 따른 스위칭 파형과 모드
Fig. 2 Switching waveform and mode under two types of duty signal

2.2 전류 평형 제어 시스템 모델링

전류 평형을 위한 보상 시비율을 V_B 라 하면, 보상 후의 시비율은 아래의 식(1)과 같이 표현 가능하다.

$$\begin{cases} V_{con1} = V_{con} + V_B \\ V_{con2} = V_{con} - V_B \end{cases} \quad (1)$$

식(1)을 이용하여 그림1, 2의 모드별 한주기에 대해 평균화 모델을 적용하면 상태공간방정식은 다음(2), (3)식과 같다.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{L1} \\ i_{L2} \\ V_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\frac{1}{L_1} \\ 0 & 0 & -\frac{1}{L_2} \\ \frac{1}{C} & \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{L1} \\ i_{L2} \\ V_o \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{V_{con} + V_B}{L_1} \\ \frac{V_{con} - V_B}{L_2} \\ 0 \end{bmatrix} V_i \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} i_{L12} \\ V_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{L1} \\ i_{L2} \\ V_o \end{bmatrix} \quad (3)$$

소신호 모델을 적용하고 $L_1=L_2$ 라 가정하면 보상 시비율 \hat{V}_B 에 대한 전류 보상 출력 \hat{i}_{L12} 전달함수는 식(4)와 같고 제어 시비율 \hat{V}_{con} 대비 출력 전압 \hat{V}_o 에 대한 전달함수는 식(5)로 간략화된다. 또한, 식(5)에서 보상 시비율 \hat{V}_B 에 대한 의존성이 사라지는 SISO(Single Input Single Output)시스템이 된다^[2].

$$\frac{\hat{i}_{L12}}{\hat{V}_B}(s) \approx \frac{2V_i}{sL} \quad (4)$$

$$\frac{\hat{V}_o}{\hat{V}_{con}}(s) \approx \frac{2RV_i}{RLCs^2 + Ls + 2R} \quad (5)$$

2.3 전류 평형 제어를 포함한 제안하는 제어 기법

2.2장에서 살펴본 것처럼 보상 시비율은 출력 전압제어와 디커플 되어 각각 독립 적인 제어기로 제어가 가능함을 알 수 있었다. 따라서 제안하는 제어 시스템의 블록도는 그림3과 같다.

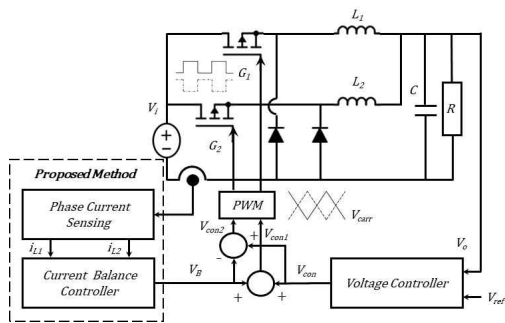


그림 3 제안하는 제어시스템 블록도
Fig. 3 Block diagram of proposed control system

Phase Current Sensing부분은 업다운 카운터의 피크지점에서 각 상의 전류를 센싱(2.1장)하고 Current Balance와 Voltage Controller는 식(4), (5)의 전달함수에 안정도와 과도 응답 성능을 확보하도록 일반적인 PI제어기로 설계를 하였다.

3. 시뮬레이션 검증

앞서 살펴본 전류 평형 제어 시스템 및 전압제어에 관한 검증은 위하여 표1사양의 1.2kW급 벅 컨버터로 PSIM 시뮬레이션을 진행하였다. 또한, 시뮬레이션에서 한쪽 상 인덕터의 인덕턴스 값을 줄이고 코일 저항을 증가하였는데 불평형 발생 시

한쪽상의 전류가 정격이상 상승하여 인덕턴스 값이 낮아지고 주유효로 코일 저항이 상승하는 현상을 모사하고자 하였다.

표 1 시뮬레이션에 사용한 벅-컨버터의 사양
Table 1 Buck-Converter Specification for Simulation

Type	Value
Rated Power	1.2 kW
Input Voltage	24 V
Output Voltage	12 V
Inductor	57.8 uH (R:1mΩ)
Switching Frequency	100 kHz

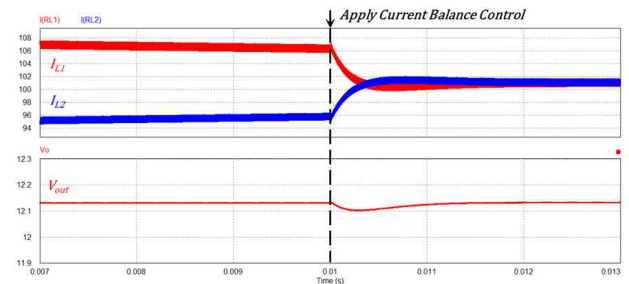


그림 4 전류 평형 제어 시뮬레이션 결과
Fig. 4 Simulation Result applying current balance control

시뮬레이션 결과 그림4와 같이 전류 평형 제어 이전에는 각 상간에 전류 불 평형이 발생하였는데 제안하는 제어 기법을 적용하면 1ms정도 이후에 상간의 동일 전류가 흐르도록 제어가 됨을 확인할 수 있었다. 위에서 서술 하였듯 몇 가지 가정 하에 평형제어 루프는 전압제어 루프와 독립 시스템이지만 실제 시스템은 상호 의존성을 가진다. 따라서 전압 제어 루프에 영향을 최대한 줄이기 위하여 응답특성을 낮게 설계하였다.

4. 결론

본 논문은 2상 인터리브드 벅-컨버터의 상간 불평형 전류 문제를 해결하기 위하여 단일 센서 기반의 전류 평형 제어 기법을 제안하였고 시뮬레이션으로 타당성을 검증하였다. 제안한 전류 평형제어 기법은 2상의 인터리브드 벅-컨버터로 국한하였지만 향후 2상 이상의 다상 인터리브드 및 다른 토폴로지의 DC-DC컨버터로의 확대 적용 연구가 가능할 것이라 생각된다.

이 연구는 2019년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임(20006633)

참고 문헌

[1] 한정호, 최유현, 송중호. (2014). 직류링크 전류를 이용한 인터리브드 양방향 컨버터의 상전류 불균형 보상 방법. 조명·전기설비학회논문지, 28(8), 90-97.
[2] H. Chen, C. Lu and L. Huang, "Decoupled Current-Balancing Control With Single-Sensor Sampling-Current Strategy For Two-Phase Interleaved Boost-Type Converters," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 63, no. 3, pp. 1507-1518, March 2016, doi: 10.1109/TIE.2015.2498135.