용량성 아이들링 SEPIC의 분석 및 구현

최 동 훈, 조 경 현, *한 완 옥, 이 성 백
광운대학교 전자공학과, *여주대학교 전자공학과
전화 : 02-940-5113 / 핸드폰 : 016-708-2812

Analysis and Hardware Implementation of the Capacitive Idling SEPIC

Dong-Hun Choi, Kyung-Hyun Joh, *Wan-Ok Han, Sung-Paik Lee
Dept. of Electronic Engineering, Kwangwoon University
E-mail : cdhjoy@hitel.net

Abstract

The capacitive idling SEPIC(Single Ended Primary Inductance Converter) is derived from the SEPIC topology. This converter is suitable for maximizing Li-Ion battery life in portable equipments. Besides, that makes it possible to increase the switching frequency without a additional circuitry. This paper is presented the characteristics of the capacitive idling SEPIC and experimental waveforms of the devices in continuous current mode.

I. 서론

최근에 노트북 컴퓨터, 셀룰러 폰, 캠코더, 미니디스크 플레이어와 같은 휴대용 전자기기의 급속한 발전으로 인해 전원으로써 배터리의 역할은 점점 그 중요성을 더해 가고 있다. 이러한 흐름에 맞춰서 일반적으로 2차 전지인 니켈-카드뮴 배터리와 리튬-이온 배터리가 널리 선택되어서 사용되고 있다. 그러나, 니켈-카드뮴 배터리는 리튬-이온 배터리와 비교했을 때, 상대적으로 낮은 에너지 밀도의 문제가 있기 때문에, 위에 나열한 고가의 휴대용 장비의 전원으로써 알맞지 않다. 이러한 이유로 전원으로써 리튬-이온 배터리의 중요성은 점점 커져가고 있지만, 대부분의 방전시간 동안에 일정한 전압을 유지하는 니켈-카드뮴과는 달리 리튬-이온 배터리는 전압이 감소하는 특성이 있다[1]. 이러한 방전특성을 갖는 배터리를 가진 전원의 수명을 늘리기 위해서 듀티비에 따른 승압과 강압이 가능한 벅-부스트 토폴로지의 특성을 요구하게 된다[2].

휴대용 전자기기의 또 다른 관심사항은 소형, 경량화에 있다. 이를 뒷받침하기 위해서는 전원부의 소형화가 이루어져야 하는데, 그 방법으로는 소용량의 캐패시터나 인덕터와 같은 소자 사용에 있다. 그러나 이러한 소용량 소자의 사용을 위해서는 스위칭 주파수의 증가가 필수적이다.

그래서 본 논문에서는 리튬-이온 배터리를 가진 휴대용 전자기기의 전원부로써 용량성 아이들링 SEPIC을 제안하였다. 그림 1에서 보여지는 리튬-이온 배터리의 방전특성은 승강압 출력특성을 갖는 SEPIC의 전압 전환비로 컨버터의 출력을 일정하게 할 수 있다. 또한 용량성 아이들링의 개념을 사용하여 컨버터의 승강압 특성을 더 넓은 범위에서 조정이 가능하게 하고,

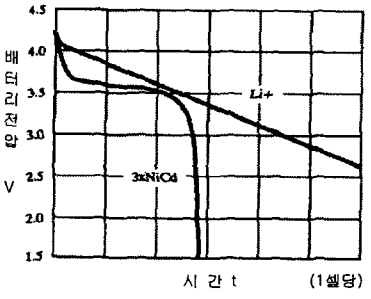


그림 1. 리튬-이온 및 니켈-카드뮴 배터리 방전특성

스위치의 부분적인 소프트 전환을 가능하게 함으로써 스위칭 주파수의 증가를 가능하게 한다.

II. 용량성 아이들링 SEPIC

2.1 SEPIC과 용량성 아이들링 SEPIC의 비교

그림 2의 (a)에서 보여지는 SEPIC에 그림(b)와 같은 형태로 소자를 추가하여 용량성 아이들링 SEPIC을 구성하였다.

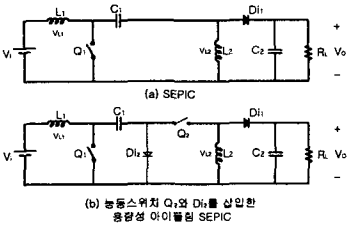


그림 2. SEPIC과 용량성 아이들링 SEPIC

제안한 컨버터와 SEPIC의 주된 차이점은 능동스위치 Q_2와 Di_2의 사용에 있으며, 또 두 개의 스위치 Q_1, Q_2에 대해 각각의 듀티비 D_1, D_2에 기인된 C_1의 아이들링 시간이다.

$$t_{idling} = (D_1 - D_2) \cdot T_s \quad (1)$$

입출력 전압을 직류에서는 절연된 상태로 만드는 커플링 캐패시터 C_1은 아이들링 시간동안에 회로로부터 분리된 상태가 된다. 이 시간을 이용하여 용량성 아이들링 SEPIC은 충전된 C_1의 에너지를 필요한 만큼 부하에 공급한 후, 캐패시터를 포함하는 회로를 개방시킴으로써, 에너지 조절기능을 가지게 된다[3].

한 주기의 스위칭 사이클 동안에 적분된 캐패시터에 흐르는 전류 i_c는 0이라는 성질을 사용하면, C_1에 대한 평균 입력전류 I_i와 평균 출력전류 I_o 의 관계는 식 (2)와 같다.

$$I_i \cdot (1 - D_1) = I_o \cdot D_2 \quad (2)$$

식 (2)를 통해서 용량성 아이들링 토폴로지의 I_i는 D_1에 의해서 제어되고, I_o는 D_2에 의해서 독립적으로 제어됨을 알 수 있다. 이 특성은 용량성 아이들링 SEPIC을 고주파 트랜스포머를 사용하여 절연을 시킨 다중출력 컨버터를 구성할 경우에 각 부하단을 독립적으로 제어할 수 있는 장점을 가지게 된다[4].

입력단으로부터 출력단으로 에너지가 전달되는 것을 고려할 때, Q_1이 턴-온하고 있을 때에만 에너지 전달이 가능하기 때문에, 아이들링 컨버터는 (3)과 같은 관계식이 성립한다.

$$D_1 \geq D_2 \quad (3)$$

2.2 직류 정상상태의 용량성 아이들링 SEPIC 전압 전환비

용량성 아이들링 SEPIC에 대해서 직류 정상상태의 전압 전환비를 구하고자 회로내의 소자를 다음과 같이 3가지의 이상적인 조건으로 놓고 해석을 한다.

첫째, 회로는 연속전류 도통모드에서 정상상태에 도달했다고 가정을 한다. 둘째로는 회로내에 있는 캐패시터 C_1과 C_2에 걸리는 전압은 일정하다고 놓는다. 이 조건을 통해 V_{C1}을 일정하게 제어함으로써 입력단의 변화에 대해 출력단을 일정하게 할 수 있다. 마지막으로 스위치와 다이오드에서 생기는 전압강하는 무시하도록 한다.

용량성 아이들링 SEPIC의 전압 전환비를 구하기 위해서 캐패시터에 적용한 것과 마찬가지로, 한 주기의 스위칭 사이클 동안에 적분된 전압 v_L은 0이라는 성질을 사용한다. 즉, L_1에 저장된 에너지는 턴-온시의 에너지와 턴-오프시의 에너지가 같으므로 식(4)와 같이 표현 된다.

$$V_i \cdot (D_1 \cdot T_s) = (V_{C1} - V_i) \cdot ((1 - D_1) \cdot T_s) \quad (4)$$

그러므로,

$$V_{C1} = \frac{V_i}{1 - D_1} \quad (5)$$

마찬가지로 L_2에 대해서 루프방정식을 세우기 위해서는 Q_2의 턴-온/오프 상태로 나누어 볼 수 있다. Q_2가 턴-온인 경우에는 (3)의 조건 때문에 Q_1은 항상 턴-온 상태이며, 이 시간은 C_1에 저장된 에너지가 방전하는 구간이다.

L_2에 대해서 방정식을 세우고 정리하면 식(6)을 얻을 수 있다.

$$V_{C1} = \frac{1 - D_2}{D_2} \cdot V_o \quad (6)$$

조건에서 캐패시터에 걸리는 전압은 일정하다고 가정했기 때문에 (5)와 (6)은 등식이 성립하고, 이 관계식을 정리하면 D_1과 D_2에 의한 전압 전환비 M은 식 (7)과 같이 표현할 수 있다.

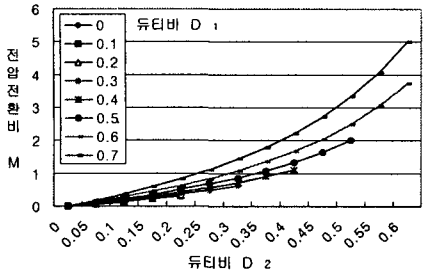


그림 3. 전압 전환비 $M(D_1, D_2)$

$$M(D_1, D_2) = \frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{1-D_1} \cdot \frac{D_2}{1-D_2} \quad (7)$$

Q_1, Q_2의 각각의 듀티비 D_1, D_2에 따른 전압 전환비 $M(D_1, D_2)$을 그림 3에 나타내었다. 각 D_1의 값에 따른 D_2의 변화하는 모습은 일반적인 벅-부스트의 전압 전환비와 비슷한 형태의 비선형적인 곡선을 그리면서 상승하는 모습을 볼 수 있다. 그러나 전체적인 데이터는 추가된 Q_2로 인해서 $M(D_1, D_2)$의 범위가 광범위해졌음을 알 수 있다.

그림 3을 보면, 듀티비 D_1의 값이 작아질수록 D_2가 변화할 수 있는 값이 작은 그래프로 그려지는 것을 알 수 있는데, 그것은 식(3)의 조건때문에 발생하는 부분이다.

2.3 용량성 아이들링 SEPIC의 동작모드 분석

그림 4는 스위치 Q_1과 Q_2의 듀티비 D_1, D_2에 의해 구분되는 파형을 모드별로 분석을 하였다.

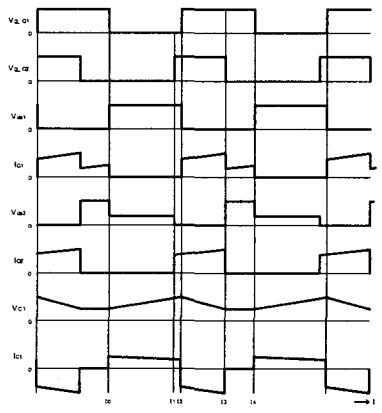


그림 4. 용량성 아이들링 SEPIC의 각 소자에 대한 이상적인 모드별 동작 과형

(1) 모드 1 [$t_0 \sim t_1$]

t_0는 스위치 Q_1, Q_2가 모두 턴-오프된 상태이다. 이때, 다이오드 Di_2는 순방향 바이어스 되어서 도통을 하게되고 C_1은 입력 전압원과 인덕터 L_1에 충전된 에너지에 의해서 충전을 한다. 이전 모드에서 C_1에 의해 L_2에 저장되었던 에너지는 부하로 방전한다.

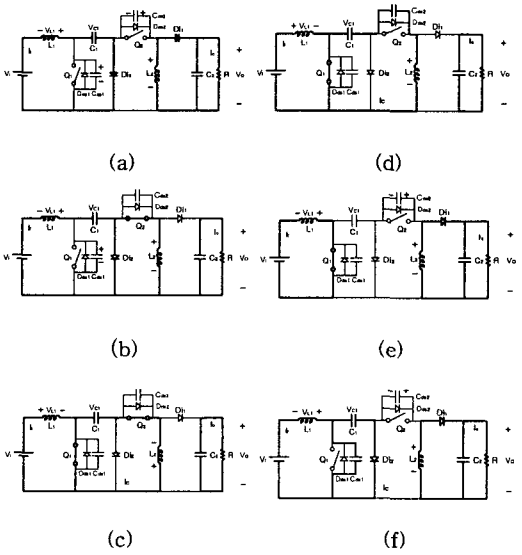


그림 5. 시간 t에 따른 회로

(2) 모드 2 [$t_1 \sim t_2$]

t_1의 시점에서, Q_2를 Q_1보다 먼저 턴-온 시키거나 동시에 해야한다. 그렇지 않은 경우에는 양 스위치에서 발생하는 전압이 더 커지게 된다. V_{C2}의 전압이 V_{L2}보다 더 높기 때문에, Di_1은 역방향 바이어스가 되어 끊어지게 된다.

(3) 모드 3 [$t_2 \sim t_3$]

t_2는 그림 5의 (c)에서 표현된 것처럼, Q_1이 턴-온 하였기 때문에, 두 개의 스위치는 모두 턴-온된 상태이다. L_1은 전압원으로부터 에너지를 충전하는 구간이고, 동시에 C_1도 Q_1을 통해서 L_2에 에너지 전달을 한다. Q_1을 통해 흐르는 전류의 양은 C_1에서 방전되는 전류 i_{C1}과 L_1에 흐르는 전류 i_{L1}의 합이 되기 때문에, 이때 Q_1의 도통손실이 최대가 된다. 스위치 Q_1을 통해서 흐르는 전류 i_{Q1}은 식(8)과 같다.

$$(V_i - v_{L1})/L_1 + (v_{C1} - v_{L2})/L_2 \quad (8)$$

(4) 모드 4 [$t_3 \sim t_4$]

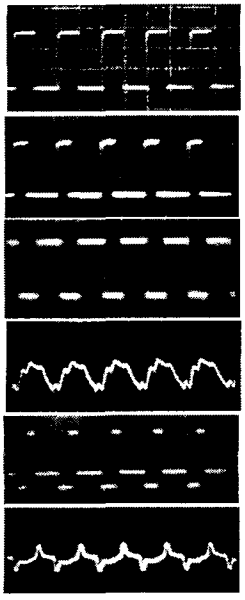
t_3에서 Q_2가 턴-오프 된다. 이 구간이 C_1의 아이들링 구간이며, C_1을 포함하는 회로 루프가 끊어진 상태이다. 따라서 충전 또는 방전상태가 아닌 C_1의 잔여 에너지를 보존하고 있는 상태이기 때문에, Q_1을 통해서 흐르는 전류는 i_{L1}뿐이다. 그림 4의 i_{Q1}과형에서 나타나는 것처럼 Q_1을 통해 흐르는 입력전류는 식(9)와 같다.

$$(V_i - v_{L1})/L_1 \quad (9)$$

III. 실험 및 결과

본 논문에서 제안된 용량성 아이들링 SEPIC의 특성을 알아보기 위해서 그림 2. (b)회로에 다음의 소자값을 적용하여 실험을 하였다.

- 입력전압 V_i = 8 V
- 듀티비 D_1 = 0.38
- 인덕터 L_1, L_2 = 500 μH
- 듀티비 D_2 = 0.28
- 캐패시터 C_1 = 47 μF
- 부하저항 = 50 Ω
- 스위칭주파수 f_s = 100 kHz



(a) V_{Q1-gs} (5V/div,5 μs/div)

(b) V_{Q2-gs} (5V/div,5 μs/div)

(c) V_{Q1-ds} (5V/div,5 μs/div)

(d) I_{Q1} (0.2A/div,5 μs/div)

(e) V_{Q2-ds} (5V/div,5 μs/div)

(d) I_{Q2} (0.5A/div,5 μs/div)

그림 6. 회로의 각 파형

입력전압은 2개의 리튬-이온셀을 직렬로 연결한 것을 가정하였으며, 부하에 5 V의 출력전압이 생기도록 Q_1, Q_2의 듀티비를 정하였다. 이 때 아이들링 시간은 1 μs로 정하였으며, 인덕터 및 캐패시터의 값은 연속전류 도통모드의 상태로 만들기 위해서 충분한 값을 주었다.

실험결과로 그림 6과 같은 각 소자의 파형을 얻었다.

VI. 결론

스위칭 주파수를 높이기 위해서 대개 공진형 회로와 같은 부가적인 회로를 첨가시키지만 회로의 복잡성과 제어의 어려움 때문에 휴대용 저전력 전자기기의 응용분야에는 알맞지 않다. 그래서 본 논문에서는 PWM 제어를 이용한 용량성 아이들링 회로를 사용하였고, 실험결과를 통해서 주파수 증가의 가능성을 확인할 수 있었다. 더욱이 리튬-이온과 같은 방전특성을 나타내는 배터리를 사용하는 휴대용 전자기기의 전원부로써 용량성 아이들링 SEPIC이 적합할 것으로 생각된다. 차후로 더 높은 스위칭 주파수에서의 실험 및 연구를 필요로 한다.

참고 문헌

[1] Richard K. Williams, Bijan Mohandes, and Chae Lee, "High-Frequency DC/DC Converter for Lithium-Ion Battery Applications Utilizes Ultra-Fast CBiC/D Process Technology", IEEE, pp.322-332, 1995

[2] Edson Adriano Vendrusculo and Jose Antenor Pomilio, "Soft Commutation in Capacitive Idling Converters", IEEE Transactions on Industrial Electronics, pp.521-522, 1998

[3] D. K. W. Cheng and W. Chan, "Design of a switching mode power supply with ups features", IEEE, pp.341-346, 1995

[4] L. D. Stevanovic and Slobodan Cuk, "Capacitive Idling Converters with Decoupled Input Voltage and Load Regulation Loops", IEEE, pp.681-688, 1993