

論文2003-40SC-1-5

용량성 아이들링 SEPIC의 분석 및 구현

(Analysis and Implementation of the Capacitive Idling SEPIC)

崔 東 勳 * , 曹 慶 鉉 ** , 羅 希 洙 ***

(Dong Hun Choi, Kyung Hyun Joh, and Hee Su Na)

요 약

휴대용 전자기기가 많이 개발되고 보급됨에 따라서 배터리의 중요성은 점점 커져가고 있다. 기기의 수명을 늘이고자 고전력밀도의 배터리를 요구하게 되었고, 현재에는 리튬-이온 배터리를 많이 사용하게 되었다. 단위체적 및 중량당의 전력밀도 부분에서는 기존에 사용하던 배터리보다 성능이 우수하지만, 방전전압이 감소하는 특성이 있기 때문에 배터리의 수명을 최대한 늘리기 위해서는 이 특성에 알맞은 컨버터가 필요하다. 그래서 리튬-이온 배터리를 사용하는 휴대용 저전력 전자기기의 전원부로서 용량성 아이들링 SEPIC을 제안하였다. 승압과 강압이 가능한 SEPIC의 특성을 가지면서, 추가된 스위치와 다이오드를 통해서 스위치에 부분적인 소프트 전환을 가능하게 하기 때문에, 스위칭 주파수의 증가를 가능하게 한다. 본 논문에서는 직류 정상상태의 전압전환비, 동작모드별 회로 및 회로특성을 분석하고 구현하였다.

Abstract

As the portable electronic equipments are developed and popularized, the batteries are more important. To prolong life of the equipments, engineers demand to have batteries of high-power density and they are used to use Li-ion batteries popularly. Li-ion batteries are better than conventional batteries, Ni-cd, about power density per volume and weight, but they have a fault that discharge voltage of them goes down. In order to maximize life of the Li-ion batteries, we have to use a converter which is suitable for the characteristic of Li-ion batteries. Therefore, capacitive idling SEPIC(Single Ended Primary Inductance Converter) that is derived from the SEPIC topology is proposed as a source of the portable low-power applications. The converter has characteristics of buck-boost performance. Besides, that makes it possible to increase the switching frequency by partial soft commutation of power switches through adding a diode and a switch. This paper is presented the characteristics, DC voltage conversion ratio, circuits of operation modes, of the converter and it is analyzed and implemented.

Keyword : SEPIC, 소프트스위칭, 전압변환비, 리튬-이온 배터리

* 學生會員, 株式會社 大洋機電

(Dai-Yang mechatronics Co., Ltd)

** 學生會員, 光云大學校 電子工學科

(Dept. of Electronics Engineering Kwang-woon Univ.)

*** 正會員, 마이크로뱅크 株式會社

(Microbank Co., Ltd)

接受日字: 2002年 1月 17日, 수정완료일: 2002年 12月 24日

I. 서 론

최근에 노트북 컴퓨터, 셀룰러 폰, 캠코더, 미니디스크 플레이어와 같은 휴대용 전자기기의 급속한 발전으로 인해 전원으로서 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 회로 방식의 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.

일반적으로 스위칭 주파수를 높이기 위해서 부가적인 회로를 첨가하여 공진형 회로를 많이 사용한다. 공진형 회로를 사용하면 컨버터의 스위치에서 발생하는 스위칭 손실과 스트레스를 상당부분 줄일 수 있어서 스위칭 주파수를 높일 수 있다. 그러나, 일반적으로 실효전류보다 더 큰 전류가 정현파의 형태로 스위치를 통해서 흐르기 때문에 PWM을 사용하는 컨버터와 비교했을 때, 도통손실이 더 커진다^[3].

배터리가 전원으로 사용되는 시스템 뿐만 아니라 요즘 개발되는 전자기기는 많은 소자들이 단일 프로세서 칩에 집적화 되어지고 있다. 또한, 빠른 데이터 처리속도를 위해서 기존의 5V IC(Integrated Chip)보다 더 낮은 전압에서 동작하는 저전압 IC를 사용하는 추세에 있다^[4]. 따라서 부하가 변함에 따라 전류가 많이 필요로 하는 특성을 가지게 되는데, 도통손실이 크다는 것은 그만큼 배터리의 수명을 단축시키는 결과를 가져오게 된다.

그래서 본 논문에서는 리튬-이온 배터리를 가진 휴대용 전자기기의 전원부로서 PWM을 사용하는 용량성 아이들링 SEPIC을 제안하였다.

<그림 1>에서 보여지는 리튬-이온 배터리의 방전특성은 승강압 출력특성을 갖는 SEPIC의 전압 변환비로 컨버터의 출력을 일정하게 할 수 있다. 또한 용량성 아이들링의 개념을 사용하여 컨버터의 승강압 특성을 더 넓은 범위에서 조절이 가능하게 하고 보조회로 없이

회로 내의 커패시터의 아이들링과 스위치 내부 다이오드의 커패시터를 이용하여 스위치에 흐르는 전류가 줄어들었을 때, off하는 방법을 사용하여 스위치의 부분적인 소프트 스위칭을 가능하게 함으로써 스위칭 주파수의 증가를 가능하게 한다.

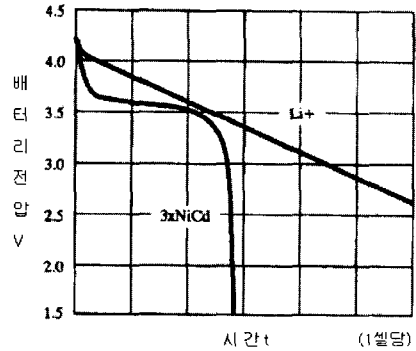


그림 1. 리튬-이온 및 니켈-카드뮴 배터리의 방전 특성
Fig. 1. Discharge characteristics of single cell Lithium ion+ and NiCd batteries.

II. SEPIC과 용량성 아이들링 SEPIC의 비교

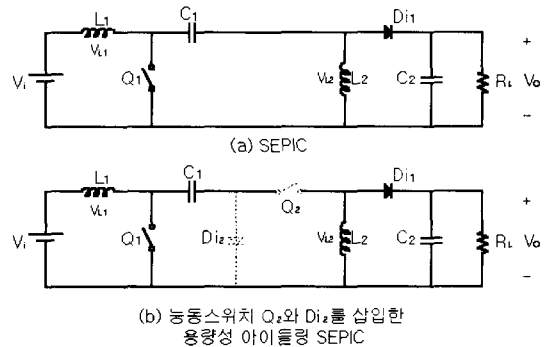


그림 2. SEPIC과 용량성 아이들링 SEPIC
Fig. 2. SEPIC and capacitive idling SEPIC

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

제안한 컨버터와 SEPIC의 주된 차이점은 능동스위치 Q_2 와 D_{12} 의 사용에 있으며, 두 개의 스위치 Q_1, Q_2 에 대해 각각의 듀티비 D_1, D_2 에 기인된 C_1 의 아이들링 시간에 있다.

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

입출력 전압을 직류에서는 절연된 상태로 만드는 커플링 캐패시터 C_1 은 아이들링 시간동안에 회로로부터 분리된 상태가 된다. 이 시간을 이용하여 용량성 아이들링 SEPIC은 충전된 C_1 의 에너지를 필요한 만큼 부하에 공급한 후, 캐패시터를 포함하는 회로를 개방시킴으로써, 에너지 조절기능을 가지게 된다^[5].

한 주기의 스위칭 사이클 동안에 적분된 캐패시터에 흐르는 전류 i_c 는 0이라는 성질을 사용하면, C_1 에 대한 평균 입력전류 I_i 와 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 회로 방식의 I_i 는 D_1 에 의해서 제어되고, I_o 은 D_2 에 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^[6].

입력단으로부터 출력단으로 에너지가 전달되는 것을 고려할 때, Q_1 이 턴-온하고 있을 때에만 에너지 전달이 가능하기 때문에, 아이들링 컨버터는 식 (3)과 같은 관계식이 성립한다.

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

III. 직류 정상상태의 용량성 아이들링 SEPIC 전압 변환비

용량성 아이들링 SEPIC에 대해서 직류 정상상태의 전압 변환비를 구하고자 회로내의 소자를 다음과 같이 4가지의 이상적인 조건으로 놓고 해석을 한다.

첫째, 회로는 연속전류 도통모드에서 정상상태에 도달했다고 가정을 한다. 둘째로는 회로내에 있는 캐패시터 C_1 과 C_2 에 걸리는 전압은 일정하다고 놓는다. 이 조건을 통해 V_{C1} 을 일정하게 제어함으로써 입력단의 변화에 대해 출력단을 일정하게 할 수 있다. 셋째로 스위치의 스위칭 시간과 다이오드의 회복 시간은 0이라고 가정하며, 마지막으로 스위치와 다이오드에서 생기는 전압강하는 무시하도록 한다.

용량성 아이들링 SEPIC의 전압 변환비를 구하기 위해서 캐패시터에 적용한 것과 마찬가지로, 한 주기의

스위칭 사이클 동안에 적분된 전압 v_L 은 0이라는 성질을 사용한다. 즉, 한주기 동안의 L_1 에 대한 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_2 에 대해서 루프방정식을 세우기 위해서는 Q_2 의 턴-온/오프 상태로 나누어 볼 수 있다. Q_2 가 턴-온인 경우에는 식 (3)의 조건 때문에 Q_1 은 항상 턴-온 상태이며, 이 시간은 C_1 에 저장된 에너지가 방전하는 구간이다.

L_2 에 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 식 (5)와 식 (6)은 등식이 성립하고 이 관계식을 정리하면 D_1 과 D_2 에 의한 전압 변환비 M 은 식 (7)과 같이 표현할 수 있다.

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

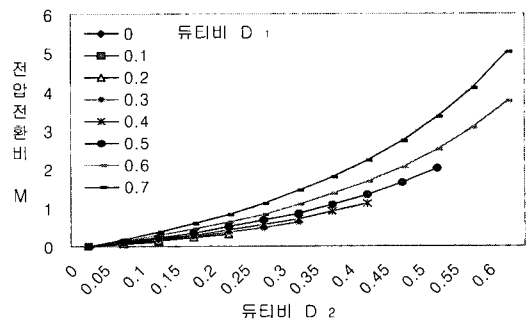


그림 3. 용량성 아이들링 SEPIC의 전압 변환비 $M(D_1, D_2)$
Fig. 3. Voltage conversion ratio $M(D_1, D_2)$ of the capacitive idling SEPIC.

Q_1, Q_2 의 각각의 듀티비 D_1, D_2 에 따른 전압 변환비

$M(D_1, D_2)$ 을 <그림 3>에 나타내었다. 각 D_1 의 값에 따른 D_2 의 변화하는 모습은 일반적인 벅-부스트의 전압 변환비와 비슷한 형태의 비선형적인 곡선을 그리면서 상승하는 모습을 볼 수 있다. 그러나 전체적인 데이터는 추가된 Q_2 로 인해서 $M(D_1, D_2)$ 의 범위가 광범위해졌음을 알 수 있다.

<그림 3>을 보면, 듀티비 D_1 의 값이 작아질수록 D_2 가 변화할 수 있는 값이 작은 그래프로 그려지는 것을 알 수 있는데, 그것은 식 (3)의 조건때문에 발생하는 부분이다. 만약 넓은 범위의 D_2 값으로 출력전압을 조정하고자 한다면 D_1 을 가능한 최대의 값으로 설정해주는 것이 필요하다.

IV. 용량성 아이들링 SEPIC의 동작모드 및 회로 분석

<그림 4>는 스위치 Q_1 과 Q_2 의 듀티비 D_1, D_2 에 의해 구분되는 파형을 모드별로 분석을 하였다.

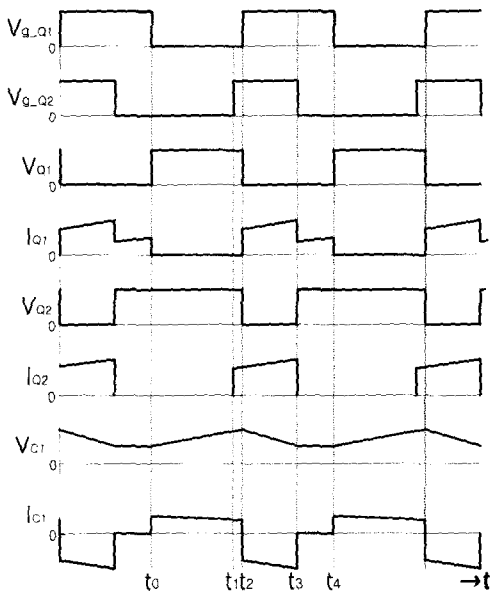


그림 4. 용량성 아이들링 SEPIC의 이상적인 동작파형
Fig. 4. Ideal operation wave form of the capacitive idling SEPIC.

(1) 모드 1 [$t_0 \sim t_1$]

t_0 는 스위치 Q_1, Q_2 가 모두 턴-오프된 상태이다. 이때, 다이오드 D_{i2} 는 순방향 바이어스 되어서 도통을 하

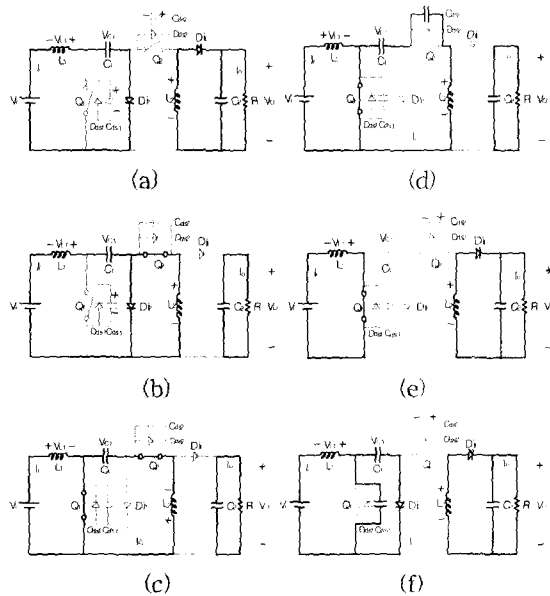


그림 5. 스위치 Q_1 의 한 스위칭 사이클 동안의 동작 회로

Fig. 5. Operation circuit during a switching cycle of the switch Q_1 .

게되고 C_1 은 입력 전압원과 인덕터 L_1 에 충전된 에너지에 의해서 충전을 한다. 이전 모드에서 C_1 에 의해 L_2 에 저장되었던 에너지는 부하로 방전한다.

(2) 모드 2 [$t_1 \sim t_2$]

t_1 의 시점에서, Q_2 를 Q_1 보다 먼저 턴-온 시키거나 동시에 해야한다. 그렇지 않은 경우에는 양 스위치의 드레인-소스단에서 발생하는 전압이 더 커지게 된다. V_{C2} 의 전압이 V_{D2} 보다 더 높기 때문에, D_{i1} 은 역방향 바이어스가 되어 끊어지게 된다.

(3) 모드 3 [$t_2 \sim t_3$]

t_2 는 <그림 5(c)>에서 표현된 것처럼, Q_1 이 턴-온하였기 때문에, 두 개의 스위치는 모두 턴-온된 상태이다. L_1 은 전압원으로부터 에너지를 충전하는 구간이고 동시에 C_1 도 Q_1 을 통해서 L_2 에 에너지 전달을 한다. Q_1 을 통해 흐르는 전류의 양은 C_1 에서 방전되는 전류 i_{C1} 과 L_1 에 흐르는 전류 i_{L1} 의 합이 되기 때문에, 이때 Q_1 의 도통손실이 최대가 된다. 스위치 Q_1 을 통해서 흐르는 전류 i_{Q1} 은 식 (8)과 같다.

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

(4) 모드 4 [$t_3 \sim t_4$]

t_3 에서 Q_2 가 턴-오프 된다. 이 구간이 C_1 의 아이들링 구간이며, C_1 을 포함하는 회로 루프가 끊어진 상태이다. 따라서 충전 또는 방전상태가 아닌 C_1 의 잔여 에너지를 보존하고 있는 상태이기 때문에, Q_1 을 통해서 흐르는 전류는 i_{L1} 뿐이다. <그림 4>의 i_{Q1} 파형에서 나타나는 것처럼 Q_1 을 통해 흐르는 입력전류는 식 (9)와 같다.

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

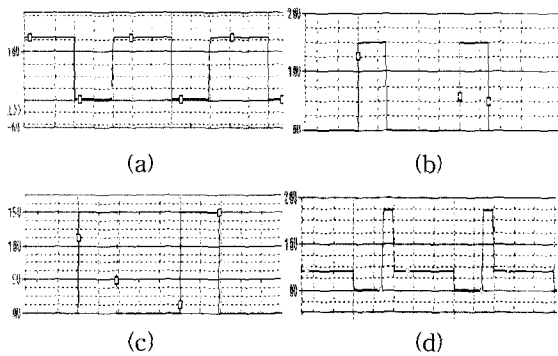


그림 6. 컨버터의 시뮬레이션 파형
 (a) 스위치 Q_1 의 게이트 입력전압
 (b) 스위치 Q_2 의 게이트 입력전압
 (c) 스위치 Q_1 의 드레인-소스 전압
 (d) 스위치 Q_2 의 드레인-소스 전압

Fig. 6. Simulation wave forms of the converter.
 (a) Input gate voltage of the switch Q_1
 (b) Input gate voltage of the switch Q_2
 (c) Drain-source voltage of the switch Q_1
 (d) Drain-source voltage of the switch Q_2

V. 실험 및 결과

본 논문에서 제안된 용량성 아이들링 SEPIC의 특성을 알아보기 위해서 <그림 2(b)> 회로에 다음의 조건을 적용하여 실험을 하였다. <그림 6>은 PSPICE에 의한 시뮬레이션 결과이고, <그림 7>은 실험을 통해 얻어진 실험파형이다.

- 입력전압 $V_i = 8V$
- 듀티비 $D_1 = 0.38$
- 인덕터 $L_1, L_2 = 500\mu H$
- 듀티비 $D_2 = 0.28$
- 캐패시터 $C_1 = 47\mu F$
- 부하저항 = 50Ω
- 스위칭주파수 $f_s = 100kHz$
- 스위치 = IRF840A

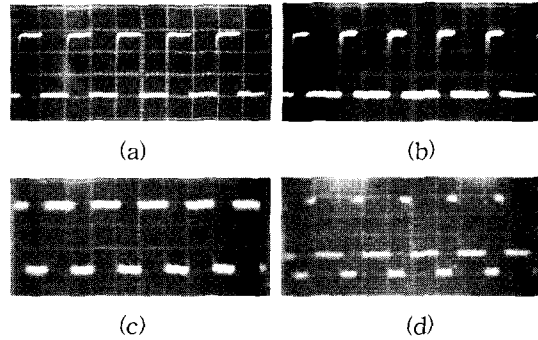


그림 7. 컨버터의 실험 파형(5V/div, 5μs/div)
 (a) 스위치 Q_1 의 게이트 입력전압
 (b) 스위치 Q_2 의 게이트 입력전압
 (c) 스위치 Q_1 의 드레인-소스 전압
 (d) 스위치 Q_2 의 드레인-소스 전압

Fig. 7. Implementation wave forms of the converter.
 (a) Input gate voltage of the switch Q_1
 (b) Input gate voltage of the switch Q_2
 (c) Drain-source voltage of the switch Q_1
 (d) Drain-source voltage of the switch Q_2

입력전압은 2개의 리튬-이온셀을 직렬로 연결한 것을 가정하였으며, 부하에 5V의 출력전압이 생기도록 Q_1, Q_2 의 듀티비를 정하였다. 이 때 아이들링 시간은 식 (1)에 의한 Q_1, Q_2 듀티비의 변환에 따른 시간 $1\mu s$ 로 정하였으며, 인덕터 및 캐패시터의 값은 연속전류 도통모드의 상태로 만들기 위해서 충분한 값을 주었다.

VI. 결 론

1. 본 논문에서는 리튬-이온 배터리를 사용하는 휴대용 전자기기의 전원부로서, PWM을 사용하는 용량성 아이들링 SEPIC을 제안하여 특성을 알아보고 구현해 보았다.

2. 제안된 컨버터는 다른 컨버터와 비교했을 때, 회로가 간단하고 제어가 용이하기 때문에 휴대용 저전력 전자기기의 응용분야에 알맞을 것으로 생각된다.

3. 제안된 컨버터는 전압 변환비와 회로분석을 통하여서 방전전압이 지속적으로 변하는 리튬-이온 배터리를 사용하는 전자기기의 전원부로서 사용 가능성을 알 수 있었다. 이 특성은 차세대 배터리인 리튬-폴리머와 같은 배터리에도 적용될 수 있을 것으로 고려된다. 실험에서 얻어진 파형을 통해서 스위치의 부분적인 소프트 스위칭을 이용하여 스위칭 주파수를 높일 수 있음

을 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] Richard K. Williams, Bijan Mohandes, and Chae Lee, "High-Frequency DC/DC Converter for Lithium-Ion Battery Applications Utilizes Ultra-Fast CBiC/DProcess 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] F. C. Lee, "High-Frequency Quasi-Resonant and Multi-Resonant Converter Technologies", Proceedings of the International Conference on Industrial Electronics, pp. 509~521, 1988.
- [4] Xunwei Zhou, Mauro Donati, Luca Amoroso and Fred C. Lee, "Improve Light Load Efficiency for Synchronous Rectifier Buck Converter", APEC '99. Fourteenth Annual, Volume: 1, pp. 295~302, 1999.
- [5] D. K. W. Cheng and W. Chan, "Design of a switching mode power supply with ups features", IEEE, pp. 341~346, 1995.
- [6] L. D. Stevanovic and Slobodan Cuk, "Capacitive Idling Converters with Decoupled Input Voltage and Load Regulation Loops", IEEE, pp. 681~688, 1993.

저 자 소 개



崔 東 勳(學生會員)

1973년 10월 21일생. 1996년 2월 목원대학교 전자공학과 졸업(학사). 2002년 2월 광운대학교 대학원 전자공학과(석사). 2001년 9월~현재 (주)대양기전 기업부설연구소 연구원. <주관심분야 : 전력 전자>

羅 希 洙(正會員)

1962년 1월 18일생. 1988년 2월 광운대학교 전자공학과 졸업(학사). 1992년 8월 광운대학교 대학원 전자공학과 졸업(석사). 2001년 2월~현재 광운대학교 대학원 전자공학과 박사과정 수료. 1999년~2001년 8월 와이티씨 텔레콤 연구소 소장. 2001년~현재 : 마이크로뱅크 연구소 소장. <주관심분야 : 음성, 화상 압축, 전력 전자>

曺 慶 鉉(學生會員)

1969년 8월 16일생. 1993년 2월 호서대학교 제어계측공학과 졸업(학사). 1999년 8월 광운대학교 대학원 전자공학과 졸업(석사). 2001년 2월~현재 광운대학교 대학원 전자공학과 박사과정. 1993년~1999년 8월 (주)제니스 정보통신. <주관심분야 : 전력 전자, DSP>