

# 소프트 스위칭 모드에 의한 고역률의 AC-DC

## 강압형 컨버터 토폴로지

°문 상필 서 기영 전 중합 김 영철 김 준홍 이 현우

경남대학교 전기공학과

### AC-DC buck converter topology of high power factor with soft switching mode

°S.P. Moon, K.Y. Suh, J.H. Chun, J.H Kim, Y.C Kim, H.W. Lee

Dept.of Electrical Engineering, KyungNam University

#### (Abstracts)

This paper proposed that a AC-DC Converter topology of high power factor with soft switching mode operates with four chopper connecting a number of parallel circuit. To improve these, a large number of soft switching topologies included a resonant circuit have been proposed. And, some simulative results on computer is included to confirm the validity of the analytical results. The partial resonant circuit makes use of a inductor using step up and a condenser of loss-less snubber. The result is that the switching loss is very low and the efficiency of system is high. And the snubber condenser used in partial resonant circuit makes charging energy regenerated at input power source for resonant operation. The proposed conversion system is deemed the most suitable for high power applications where the power switching devices are used.

#### 1. 서 론

일반적으로 AC를 DC로 변환하는 전력변환 장치에서 정류회로는 콘덴서 입력형 정류회로가 많이 사용되어 지고있다.이 회로의 입력전류는 입력 전압의 피크 부분에서 흐르는 펄스형으로 되어 입력역률이 낮으며, 많은 고조파 성분이 포함된 전류

로서 전원계통에 나쁜 영향을 주게된다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서 “소프트 스위칭 모드에 의한 고역률의 AC-DC 강압형 컨버터 토폴로지”가 많이 제안되고 있다.

본 논문에서는 다수개 병렬로 접속한 4초퍼 식으로 소프트 스위칭 모드에 의한 고역률의 AC-DC 강압형 컨버터의 토폴로지를 제안한다.

제안된 컨버터는 듀티율 일정 스위칭 제어에 의해 전류 불연속 모드로 동작되어 고출력 컨버터로 동작되며, 스위칭의 턴-온, 턴-오프 동작을 소프트 스위칭으로 만들어 변환기의 효율의 증대, 고역률화를 해석 및 시뮬레이션으로 확인한다.

#### 2. 소프트 스위칭 기법

소프트 스위칭 회로를 그림 1에 나타낸다. 스위칭 소자  $S_1, S_2$ 와 병렬로 공진용 콘덴서  $C_r$ 이 연결되어 있으며, 직렬로 공진용 인덕터  $L_r$ 이 접속된다. 스위치의 턴-온, 턴-오프 시에 대한 각 파라메타의 전압 및 전류파형은 그림 2와 같으며, 스위치 동작을 살펴 보면 다음과 같다

- SW-ON시 : 초기조건으로 인덕터  $L_r$ 의 전류  $I_L$ 는 제로이며 콘덴서  $C_r$ 에는 전압  $V_c$ 로 충전되어 있다. 고 가정하면, 스위치 온 직전의 인덕터에 흐르는 전류  $I_L$ 는 제로 이므로 스위치  $S_1, S_2$ 의 온 동작은 제로

전류 스위칭(ZCS)을 이룬다. 스위치의 온 동작에 의해서 LC 직렬공진 회로가 형성되어 인덕터 전류  $i_L$ 는 식 (1)과 같이 증가하고, 콘덴서  $C_r$ 의 전압  $v_c$ 는 식 (2)로 되어 제로로 감소한다.

$$i_L = \frac{2V + V_c}{X} \sin \omega t \quad (1)$$

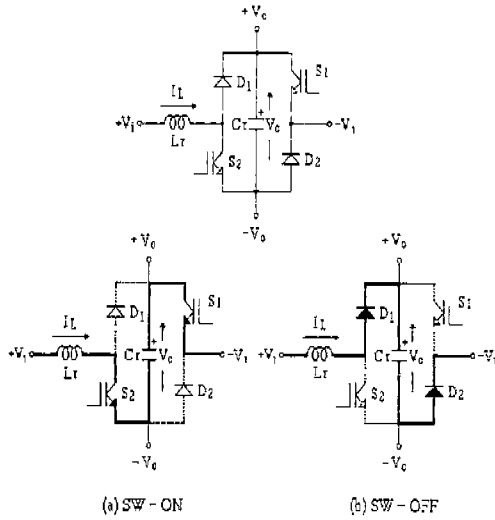


그림 1 PRSM 회로 토폴로지  
Fig. 1 PRSM circuit topology

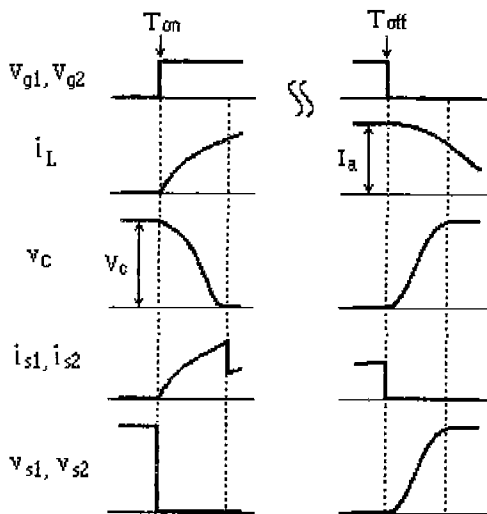


그림 2 PRSM의 동작파형  
Fig. 2 Operating waveforms of PRSM

$$v_c = (2V + V_c) \cos \omega t - 2V \quad (2)$$

여기서

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{L_r C_r}} \quad , \quad X = \sqrt{\frac{L_r}{C_r}}$$

◦ SW-OFF시 : 스위치 오프 직전의 조건으로 콘덴서  $C_r$ 의 전압  $v_c$ 는 제로이며 인덕터  $L_r$ 에는 전류  $I_a$ 가 흐른다고 가정하면, 스위치 오프 직전의 콘덴서에 전압은 제로 이므로 스위치  $S_1, S_2$ 의 오프 동작은 제로 전압 스위칭(ZVS)을 이룬다. 스위치의 오프 동작에 의해서 다이오드  $D_1, D_2$ 가 도통되고 LC 직렬공진 회로가 다시 형성되어 콘덴서  $C_r$ 의 전압  $V_c$ 는 식 (3)과 같이 증가하고, 인덕터 전류  $I_L$ 는 식 (4)로 되어 에너지를 방출한다.

$$v_c = 2V + \sqrt{\frac{L_r}{C_r}} I_a \sin(\omega t + \theta) \quad (3)$$

$$i_{Lr} = I_a \cos(\omega t + \theta) \quad (4)$$

여기서

$$\theta = \sin^{-1} \left( -\frac{2V}{\sqrt{\frac{L_r}{C_r}} I_a} \right)$$

이상에서와 같이 공진회로는 공진 한주기 동안 지속적으로 이루어지지 않고 스위치 턴-온과 턴-오프시에 공진주기 일부분에서 부분적으로 형성되므로 “부분공진 기법”이라 한다. 이것은 공진 소자들의 용량분담과 스트레스를 줄이고 출력전류가 증가할 경우 공진 손실을 감소 시켜준다. 그리고 부분공진의 기법에 의해 사용된 스위치들은 소프트 스위칭으로 되므로 시스템의 효율을 증대시키고  $dv/dt, di/dt$ 에 의한 전자유도 잡음 등을 줄일 수 있다.

제안한 부분공진 회로의 구성을 보면 사용된 공진용 인덕터는 일반적인 강압형 컨버터에 사용되는 에너지 축적용 인덕터로 대체할 수 있으며, 공진용 콘덴서는 스위칭 모드 전력변환기에 이용되는 스너버 회로의 스너버 콘덴서로 대체할 수 있다. 그래서 본 논문에서는 이러한 장점을 겸비한 회로구성의 토폴로지를 제안한다.

### 3. 회로 구성

소프트 스위칭 모드에 의한 고역율의 AC-DC 강압형 컨버터의 주 회로도를 그림3에 표시한다. 회로구성은 기존의 AC-DC 컨버터의 입력측과 부하단 사이에 소프트 스위칭과 강압을 겸하는 부분 공진 회로부를 접속한다.

부분 공진회로부는 제어소자들과 공진용 인덕터 그리고 로스레스 스너버 콘덴서로 구성되며, 콘덴서에 축적된 에너지는 스위치들의 턴-온 시에 전원측으로 회생되는 모드를 가진다.

스위치  $S_1, S_2$ 의 턴-온은 인덕터의 전류가 불연속으로 제어되므로 영전류 스위칭(zcs)으로 되고, 턴-오프는 콘덴서의 전압이 영으로 될 때 동작하므로 영전압 스위칭(zvs)으로 된다.

입력단의 인덕터( $L_1$ )와 콘덴서( $C_1$ )는 입력전류의 고조파를 제거하기 위한 필터로 동작한다.

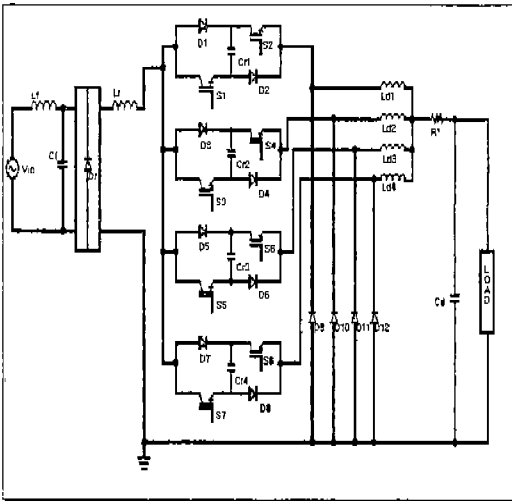


그림. 3 소프트 스위칭 모드에 의한 고역율의 AC-DC 강압형 컨버터의 주회로도  
Fig. 3 AC-DC Converter of High power factor with soft switching mode

### 4. 동작 원리

출력 부하측 인덕턴스와 비교하여 충분히 큰 것으로 가정하면, 공진 1주기 동안에는 부하를 정전류원  $I_0$ 로 보는 것이 가능하다. 부분공진 회로부의 초기조건으로 스위치  $S_1, S_2$ 는 오프, 공진용 콘덴서  $C_{21}$ 에는 출력측 평활용 콘덴서  $C_2$ 의 전압  $V_{C2}$ 로 충전되어 있다. 또한 교류 입력전압  $V_m$ 과 다이오드

브릿지 전파정류기의 출력전압  $V_r$ 은 다음 식으로 놓는다.

$$V_m = V_m \sin \omega_s t$$

$$V_r = |V_m| = |V_m \sin \omega_s t|$$

### 5. 시뮬레이션 결과 및 검토

제안한 고역율의 AC-DC 강압형 컨버터의 스위칭 동작에 대한 각부 시뮬레이션 파형을 그림.4에 나타낸다. 제어 스위치는 가변저항 스위치로 가정하고, 그 외 소자는 이상적인 소자로 간주하여 PSpice에 의한 시뮬레이션을 실행하는 결과이다. 시뮬레이션에 사용된 회로정수들을 표.1에 나타낸다. 그림.5에서 인덕터 전류  $i_{Lr}$ 는 입력전원 반주기에 대해 정현파 입력전압의 크기에 비례한 정현파상의 펄스열로 나타남을 알 수 있다.

그림.5은 소프트 스위칭 모드에 의한 고역율의 AC-DC 강압형 컨버터와 그에 따른 소프트 스위칭 동작을 확인하기 위하여 스위칭 주파수 20kHz, 듀티율 40%인 스위칭 한 주기에 대한 각부 시뮬레이션 파형을 나타낸다.

표 1 시뮬레이션에 사용된 회로정수  
Table 1 Parameters of simulated circuit

입력전원전압실효치	100V
입력전원주파수	60Hz
스위칭주파수	20kHz
듀티율	40%
평활인덕턴스	40uH
평활콘덴서	1000μF
필터인덕턴스	80uH
필터콘덴서	100μF
부하저항	1Ω

그림.5는 스위치의 스트레스를 줄이고, 출력전류가 증가할 경우의 공진 시뮬레이션 결과파형에서 부분공진회로는 공진 한주기 동안 지속적으로 이루어지지않고 스위치의 턴-온과 턴-오프 때에 부분적인 공진 동작을 볼 수 있으며, 이러한 동작에 의해 공진 소자들의 용량분담과 손실이 감소된다.

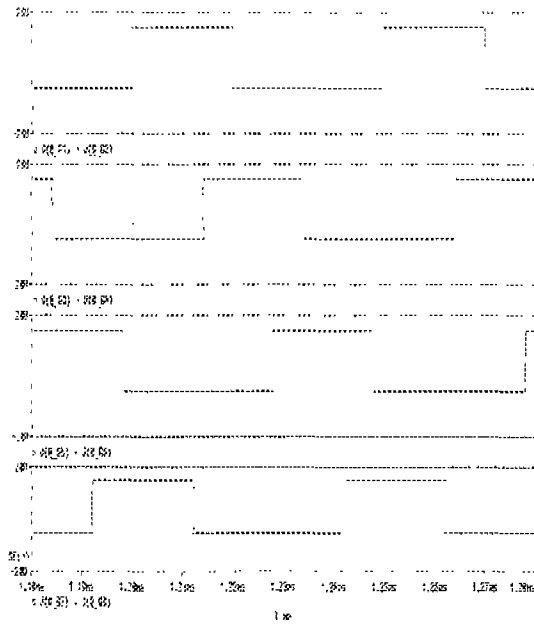


그림.4 고역율의 AC-DC 강압형 컨버터의 스위칭 동작 파형

Fig.4 Switching operation waveforms of AC-DC buck converter with high power factor

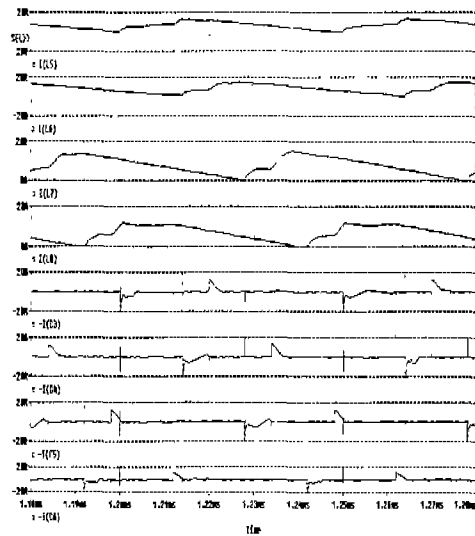


그림.5 각부 시뮬레이션 파형

Fig.5 Simulation waveforms of each part

또한, 그림.6에는 각 모드의 구간에 대해서 나타내고 있으며, 시간  $t_0$ 에서 스위치  $s_1$ ,  $s_2$ 를 턴-온하면, LC 직렬 공진회로에 의한 콘덴서  $C$ ,이 방전을 시작하고 인덕터  $L$ ,는 에너지를 축적한다. 이 시점에서의 스위  $s_1$ ,  $s_2$ 를 통하는 전류  $i_s$ 는 인덕터 전류  $i_L$ ,와 같으므로, 스위치들은 ZCS로 동작을 한다. 시간  $t_1$ 에서

콘덴서 전압이 영으로 되면, 제어 스위치들에 의한 단락 회로가 형성되어 인덕터  $L$ ,의 전류는 직선으로 증가하며 에너지를 축적한다.

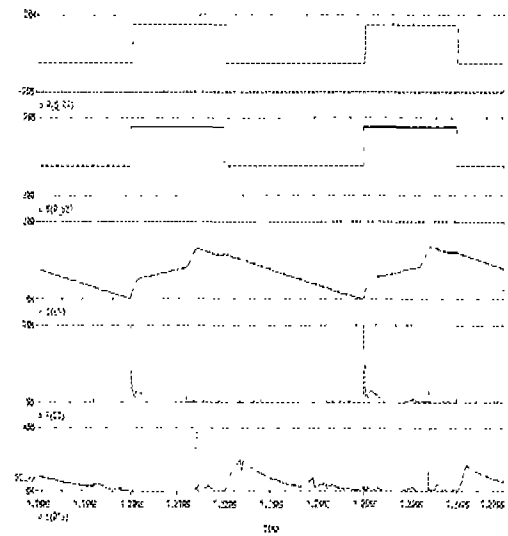


그림.6 스위칭 한주기에 대한 각부 시뮬레이션 파형

Fig.6 Simulation waveforms of each part in one cycle switching

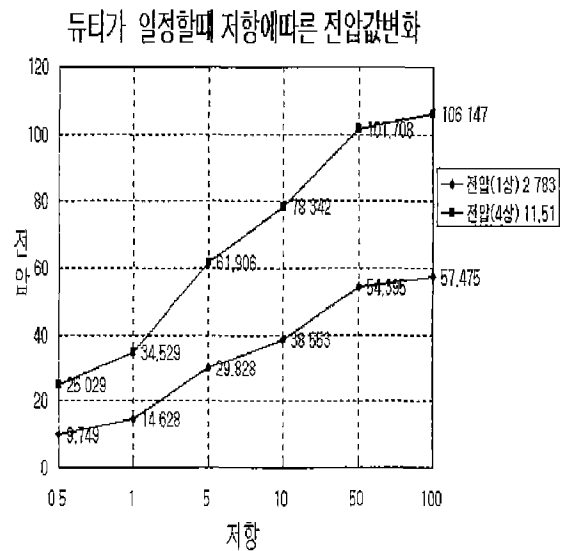


그림.7 듀티율  $D_c (= T_{on}/T_c)$ 가 일정할 때 저항에 대한 출력전압의 변화

Fig.7 Relationship between output voltage and duty cycle

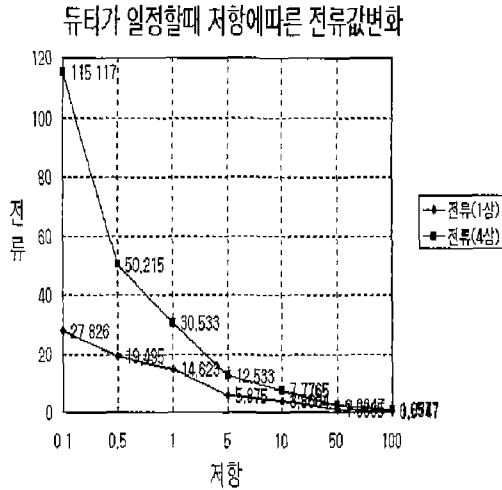


그림.8 듀티율  $D_c (= T_{on} / T_c)$ 가 일정할때 저항에 대한 출력전류의 변화  
Fig.8 Relationship between out cueueent and duty cycle

그림.7과 그림.8은 듀티율  $D_c (= T_{on} / T_c)$ 가 일정할 때 저항에 대한 출력전압과 출력전류의 변화를 시뮬레이션 결과를 토대로 하여 나타내었으며, 시뮬레이션에 있어서 사용된 다른 회로 정수들은 표.1를 근거로 한다.

제한한 고역율의 AC-DC 강압형 컨버터는 동일한 전력용량 하에서 기존의 하드 스위칭 승압형 컨버터와 비교하여 스위칭의 듀티율을 적게해도 동일출력을 낼 수 있다는 장점이 부여된다. 이것은 스위치의 턴-온 동작에 의해 부분 공진용으로 이용된 로스레스 스너버 콘덴서의 축적된 에너지가 입력측으로 회생되어 인덕터에 추가되기 때문이다.

그림.9은 제한된 고역율의 AC-DC 강압형 컨버터의 회로정수들을 이용한 입력전압과 입력전류에 대한 시뮬레이션 파형이다. 이 회로에서는 부분공진용 스너버 콘덴서의 방전전류가 전원측으로 회생되어 입력전류의 제로 부근을 부스트시키므로 파형이 정현파에 더욱 가깝게 된다. 그래서 본 방식은 저차 고조파 성분이 감소되어 왜형율이 개선되는 특징이 주어진다. 입력전류의 고조파 성분을 해석하기 위하여 복소 이중 푸리에 급수전개를 이용하면 입력전류  $i_{in}$ 는 다음 식으로 주어진다.

$$i_{in} = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} K_{mn} e^{j(mx+ny)}$$

$$K_{mn} = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} i_{Lr}(x,y) \cdot e^{-j(mx+ny)} dx dy$$

여기서  $i_{Lr}$ 는 인덕터  $L_r$ 의 전류이며,  $x = \omega_c t$ ,  $y = \omega_s t$ 로써  $\omega_c$ 는 스위칭 각주파수이고,  $\omega_s$ 는 교류 입력 전원의 각주파수를 나타낸다

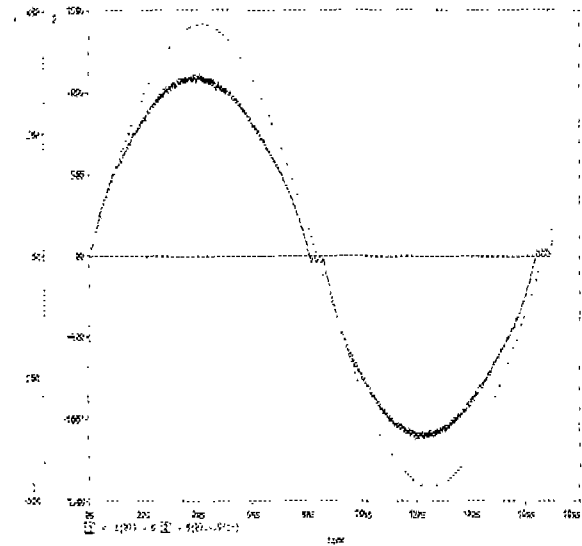


그림.9 입력전압과 입력전류에 대한 시뮬레이션 파형  
Fig.9 Simulation waveforms with input voltage and current

## 6. 결 론

일반적으로 강압형 AC-DC 컨버터 회로는 반복적인 공진으로 인한 부분 공진용 소자의 용량 분담 증가와 전력용 반도체 소자의 피크전압 및 피크전류, 순환전류의 증대 등의 문제점이 나타나며 또한, 스위칭의 제어기법들이 복잡해지는 어려움도 있었다.

본 논문은 이러한 결점을 부분적으로 개선하기 위하여 고역율의 AC-DC 강압형 컨버터의 모드를 제안하였다. 부분 공진형 소프트 스위칭 기법(PRSSM)에 의해 사용된 스위치들은 소프트 스위칭에 스위칭 손실이 저감되며, 공진회로부는 부분공진으로 인하여 공진손실 및 공진용 소자들의 스트레스가 감소되므로, 변형기들은 고출력, 고효율로 동작된다. 소프트 스위칭 모드에 의한 고역율의 AC-DC 강압형 컨버터는 스위치 듀티를 일정 제어에 의해 정현과 입력전압의 크기에 비례해서 입력전류가 불연속적인 정현 펄스상의 전류가 되므로 입력역율이 거의 단위역율로 되며, 스너버 콘덴서의 에너지 회생에 의해 기존의 AC-DC 컨버터 보다 제3고조파 성분이 상쇄되어 왜형율이 개선되는 특징을 갖는다.

본 논문은 컴퓨터 시뮬레이션과 실험을 통하여 그 효율성과 타당성을 입증하였고, 앞으로 AC-DC 컨버터를 최적의 필터와 부하전류를 고려한다면 보다 높은 출력, 역율, 효율을 갖을거라 사료된다.

## 참 고 문 헌

1. Meng-Yu Chang, Jiann-Yow Lin, Ying-Yu Tzou, "DSP-based Fully Digital Control of a AC/ DC Converter with Nonlinear Digital Current Mode Control", '96 IEEE Records, pp. 1702 -1708, 1996.
2. 이경진, 이현우 등 : "부분공진형 승압형 AC-DC 컨버터의 입력전류 해석", 전기학회 하계학술대회 논문집A, pp.185 -187, 1995.
3. 長尾道彦, 今永定利, 原田耕介, "不連続 モー ト 動作 高力率 昇降壓形 AC-DC 레ギュ레타 特性解析", 電子情報 通信 學會 新學技報, 93-9 pp.12-22, 1993
4. HYUN-WOO LEE etc: "Using a Lossless Snubber for Soft-Switching Three-Phase High Power Factor Converter ", ICPE '95 INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWERELECTRONICS, pp.355-360, 1995.10.10-14.
5. J.W.Kolar, H.Ertl & F.C.Zach, "A novel single-switch three-phase AC/DC buck-boost converter with high-quality input current waveforms and isolated DC output", INTELEC, pp.407-414, 1993.
6. 仲谷行雄, 谷口醒則, "降壓形 コンバータ의 特性解析", 半導體電力變換研究會連丘資料, SPE-95-87, 1995
7. 문상필, 서기영, 이현우 등: "고출력화를 위한 부분공진형 AC-DC 컨버터", 전기학회 추계학술대회 논문집A, pp.3-6, 1997.