論 文 11-6-6

고효율 플라이백 컨버터를 위한 새로운 에너지 회복회로

鄭龍采†

Novel Energy Recovery Circuit for High Efficiency Flyback Converter

Yong-Chae Jung

요 약

요즘 많은 연구자들이 전력변환회로의 효율을 올리는데 이전보다 훨씬 많은 관심을 기울이고 있다. 플라이백 컨버터에서 RCD 스너버의 저항은 누설인덕터에 저장된 에너지를 소모한다. 이는 전체 시스템 효율을 감소시키는 역할을 한다. 그래서 이 논문에서는 효율을 향상시키기 위해서 플라이백 컨버터의 새로운 에너지 회복회로를 제안한다. 제안된 회로의 동작원리를 자세히 설명한다. 그리고 이를 모의실험 및 실험을 통해서 확인한다.

ABSTRACT

Nowadays, more than ever before, many researchers take much interest in raising the efficiency of a power converter. In Flyback converter, the resistor of RCD snubber consumes the stored energy in leakage inductor. It plays a role in degrading the overall system efficiency. Thus, in this paper, a novel energy recovery circuit of Flyback converter is proposed to improve the efficiency. The operational principle of the proposed circuit is explained in detail. And, it is verified through the simulation and experimental results.

Key Words : Flyback Converter, SMPS, RCD Snubber, Energy Recovery

1. 서 론

직류전원회로로 가장 많이 사용되는 것은 SMPS (Switch Mode Power Supply)이다. 특히, 150[W] 이하의 낮은 전력용으로는 플라이백 컨버터가 주로 사용된다[1].

플라이백 컨버터의 동작을 자세히 살펴보면 트랜스포머의 자화 인덕터를 에너지 저장소자로 활용하고 있다. 저장된 에너지는 스위치가 오프 되었을 때 이차측으로 전달된다. 하지만 누설인덕터에 저장된 에너지는 이차측으로 전달되지 못하고 저항에서 열로 모두 소모한다. 이런 용도로 사용되는 것이 RCD 스너버이다[2].

고효율 전원회로를 구성하려면 저항에서 소모되는 이 에너지를 줄여야 한다. 그러기 위한 방법으로 이 에너지를 입력전원으로 되돌리는 방법이 있다[3-5]. 이러한 분야의 연구가 최근까지 활발히 연구되고 있다[6, 7]. 하지만 이러한 방식들은 에너지를 되돌리기 위해서 첨가되는 부품이 많은 단점이 있다.

따라서, 본 논문에서는 첨가되는 부품을 최소화 하면서 누설인덕터에 저장된 에너지를 출력측으로 전달할 수 있는 새로운 방식의 에너지 회복회로를 제안한다. 제안된 회로와 비교하기 위하여 기존의 RCD 스너버의 동작을 미리 알아본다. 그리고 제안된 회로의 동

†교신저자 : 정회원, 남서울대 전자공학과 부교수
E-mail : ychjung@nsu.ac.kr
접수일자 : 2006. 8. 24 1차 심사 : 2006. 9. 15
심사완료 : 2006. 10. 2

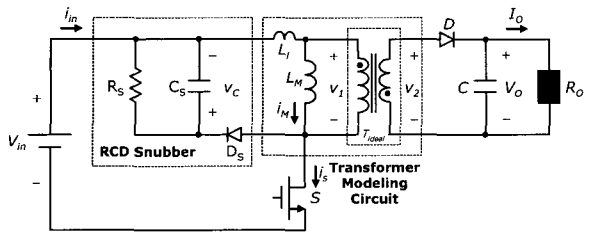


그림 1 기존의 RCD 스너버를 갖는 플라이백 컨버터
Fig. 1 Flyback converter with a conventional RCD snubber

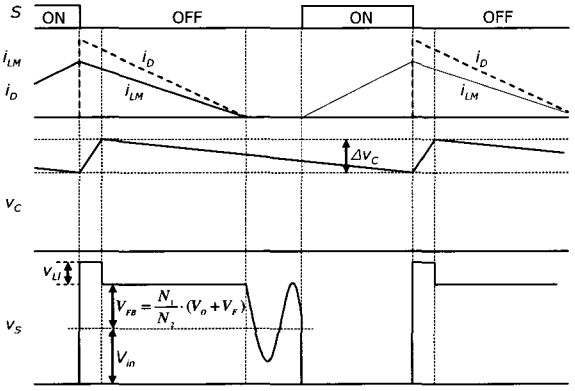


그림 2 기존 플라이백 컨버터의 동작파형
Fig. 2 Operational Waveforms of the conventional Flyback converter

작원리를 자세히 알아보고 PSpice 시뮬레이션을 통해서 동작을 확인한다. 끝으로 이를 확인하기 위해서 15[V], 6[A] 출력을 갖는 SMPS를 제작하여 효율향상을 직접 확인한다.

2. 기존의 RCD 스너버 회로

그림 1은 플라이백 컨버터에 트랜스포머의 모델링 회로와 RCD 스너버를 적용한 회로이다. 트랜스포머의 모델링 회로는 이상적인 트랜스포머 T_{Ideal}과 자화 인덕터 L_M 그리고 누설 인덕터 L_l로 구성되어 있다. 이 때 이차측의 누설 인덕터는 작기 때문에 무시하였다. 이차측으로 전달되지 않는 누설인덕터에 저장된 에너지는 RCD 스너버의 커패시터에 저장했다가 저항으로 소모시켜서 제거한다.

이 회로의 동작을 간단히 설명하면 다음과 같다. 먼저 스위치가 켜지면 누설 인덕터와 자화 인덕터에 입력전압이 각 인덕터의 크기에 비례해서 나뉘어 걸려서 선형적으로 증가하는 전류가 흐른다. 정해진 온 시간이 지나면 스위치가 꺼진다. 이때 자화 인덕터에 흐르던 전류는 이상적인 트랜스포머의 일차측으로 흐르고, 이는 이차측의 전류를 발생시키며, 이차측으로 자화 인덕터에 저장된 에너지를 전달한다. 하지만 누설인덕터에 흐르던 전류는 RCD 스너버의 D_S와 C_S를 통해서 흐르며 누설인덕터에 저장된 에너지가 스너버 커패시터 C_S로 전달된다. 누설 인덕터의 전류가 영이 되면 스너버 다이오드 D_S는 꺼지고, 스너버 커패시터에 증가된 에너지는 스너버 저항 R_S를 통해서 소모한다.

그림 2는 기존의 RCD 스너버를 갖는 플라이백 컨버터의 동작파형으로 불연속모드로 동작할 때의 경우이다. 스너버 커패시터의 전원은 일정한 평균값 V_{ave}를 가지며 스위치 오프 시 짧은 시간동안 충전된다. 나머지 시간은 RC 방전을 하게 된다. 여기서 저항에서 소비되는 전력은 다음 식과 같이 계산된다.

$$P_R = \frac{1}{2} C_s \left\{ V_{pk}^2 - \left(V_{pk} e^{-\frac{t_{reset}}{\tau}} \right)^2 \right\} \times f_{sw} = \frac{V_{ave}^2}{R_s} \quad (1)$$

여기서 V_{pk}는 커패시터 전압의 피크 값이고 τ는 RC 시상수이다. 그리고 t_{reset}은 커패시터를 충전하는 시간이고 f_{sw}는 스위칭 주파수이다.

그런데 누설인덕턴스에 저장된 에너지는 다음식과 같이 표현된다.

$$P_R = \frac{1}{2} L_l I_{1pk}^2 \times f_{sw} \quad (2)$$

이 값은 누설인덕턴스와 동작상태가 정해지면 고정된 값이다. 따라서 식(1)의 값도 고정된 값이 된다. 따라서 만일 스너버 저항 R_S가 커지면 스너버 커패시터에 걸리는 전압의 평균값 V_{ave}도 함께 커진다. 이 전압이 스위치의 전압 스트레스를 증가시키는 역할을 하므로 스너버 저항 R_S의 값을 적절히 조절해 주어야 한다.

3. 새로운 누설 에너지 회복회로

그림 3은 본 논문에서 제안하는 새로운 개념의 플라이백 컨버터용 에너지 전달회로이다. 기존의 RCD 스

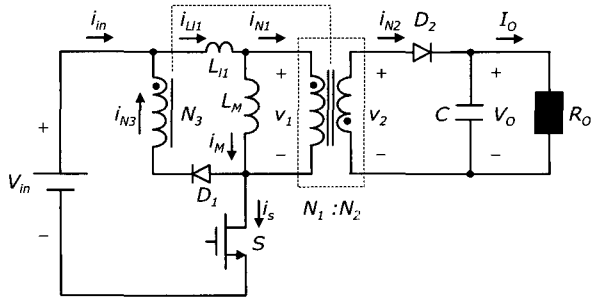


그림 3 제안된 플라이백 컨버터용 에너지 전달회로
Fig. 3 The proposed energy transfer circuit for Flyback converter

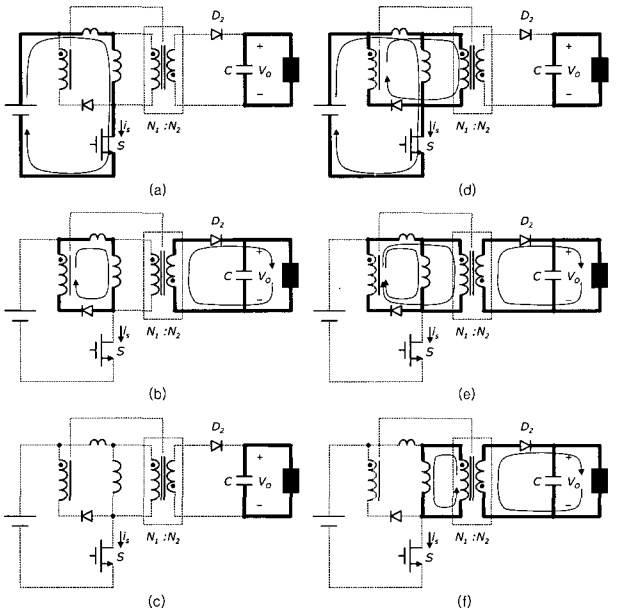


그림 4 제안된 회로의 모드 다이어그램
Fig. 4 Mode diagrams of the proposed circuit

너버 대신에 트랜스포머 권선 N_3과 다이오드 D_1이 첨가되었다. 여기서 트랜스포머 권선 N_3은 일차측 권선 N_1보다 약간 크면 된다.

그림 4는 제안된 회로의 동작모드별 전류 흐름도이다. 이 중 (a)-(b)-(c)는 N_1과 N_3의 턴수비가 적절한 경우이고, (d)-(e)-(f)-(c)는 N_1과 N_3의 턴수비가 큰 경우이다. N_1과 N_3의 턴수비가 큰 경우는 스위치가 켜져 있을 때 D_1도 켜져서 누설 인덕터의 전류가 자화 인덕터의 전류보다 커진다.

그림 5는 불연속 모드에서 그림 4의 (a)-(b)-(c) 모드로 동작할 때의 동작파형이다. 이 동작을 정리해보

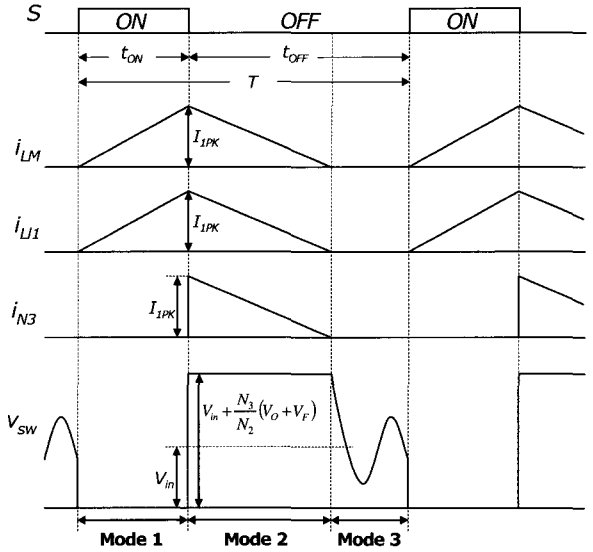


그림 5 제안된 회로의 동작파형 (불연속 모드)
Fig. 5 Operational waveforms of the proposed circuit (Discontinuous Mode)

면 다음과 같다. 스위치가 켜지면 그림 4(a)와같이 누설 인덕터와 자화 인덕터에 입력전압이 걸려서 그림 5와 같이 선형적으로 증가하는 전류가 흐르고 각 인덕터에 에너지를 저장한다. 정해진 시간에 스위치가 꺼지면 그림 4(b)의 Mode 2와 같이 세 번째 권선 N_3를 통해서 이차측으로 에너지를 전달한다. 이런 동작을 통해서 누설인덕터에 저장된 에너지는 저항에서 소모되는 것이 아니라 이차측으로 전달됨으로써 효율을 상승시키는 역할을 한다. 이때 각 전류는 선형적으로 감소하고 전류가 영이 되면 일정기간 각 인덕터에 전류가 흐르지 않는 그림 4(c)의 Mode 3이 진행된다. 이 모드는 정해진 스위칭 주기가 끝나면 같이 끝난다.

스위치가 켜져 있을 때 D_1이 켜지지 않는 조건은 다음 식 (3)과 같다.

$$N_3 \leq \frac{L_M + L_{l1}}{L_M} \cdot N_1 \tag{3}$$

단, 각 스위칭 소자는 이상적이라고 가정한다. 하지만, 실제적으로는 다이오드 D_1의 순방향 회복 전압 (Forward Recovery Voltage) 때문에 계산치 보다는 좀 더 커도 된다. 또한, 이 값이 너무 작으면 누설인덕터에 흐르는 전류가 모두 영으로 감쇠되지 않을 수도 있으므로 식 (3)에서 최대값을 취하는 것이 바람직하다.

4. 모의실험결과

표 1 모의실험 적용값
Table 1 Applied values for Simulation

항 목	설 계 값	비 고
입력전압	110[V_{dc}]	85[V_{ac}]-마진
출력	12[V] / 2.55[A]	
누설 인덕턴스	16[μH]	
자화인덕턴스	404[μH]	
RCD Snubber	C_S=10[nF] R_S=10[kΩ]	

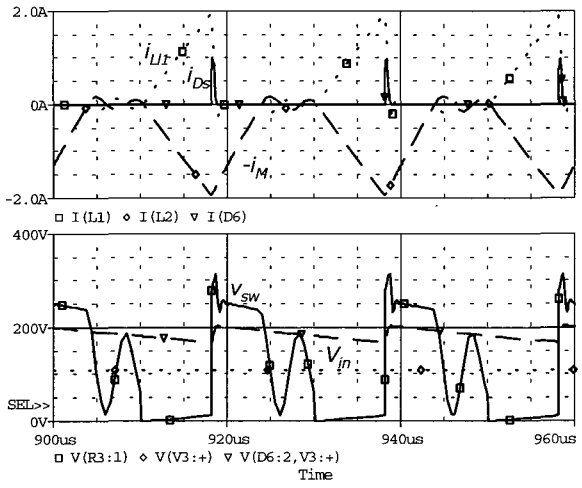


그림 6 RCD 스너버를 갖는 플라이백 컨버터의 동작파형
Fig. 6 Operational waveforms of Flyback converter with RCD snubber

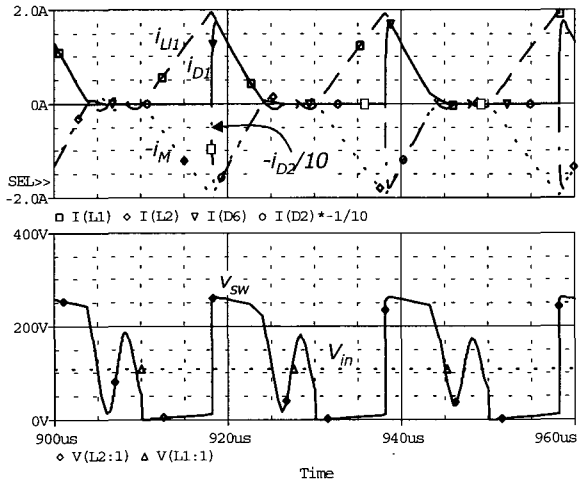


그림 7 제안된 회로의 동작파형 (N_3:N_1=103:100)
Fig. 7 Operational waveforms of the proposed circuit (N_3:N_1=103:100)

앞에서 언급한 동작을 확인하기 위해서 모의실험을 하였다. 모의실험 프로그램은 OrCAD PSpice Ver. 9.1

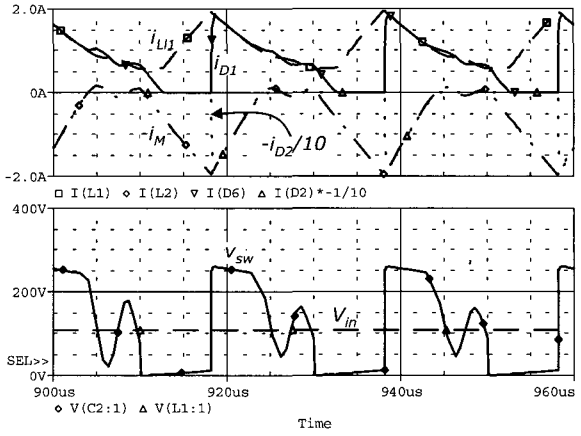


그림 8 제안된 회로의 동작파형 (N_3:N_1=101:100)
Fig. 8 Operational waveforms of the proposed circuit (N_3:N_1=101:100)

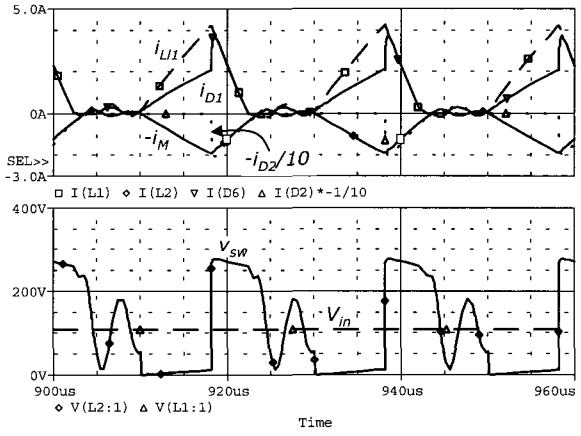


그림 9 제안된 회로의 동작파형 (N_3:N_1=110:100)
Fig. 9 Operational waveforms of the proposed circuit (N_3:N_1=110:100)

을 사용하였다.

모의실험결과의 정확도를 확인하기 위해서 제안된 회로를 모의실험하기 전에 기존에 잘 알려져 있는 RCD 스너버 회로를 갖는 플라이백 컨버터의 동작을 먼저 확인해 보았다.

표 1의 조건으로 모의실험을 하였는데 여기서 교류입력전압을 85~265[V]로 하면 최소 전압 85[V]에 대해서 마진을 고려하여 직류입력전압을 110[V]로 결정했다. 표 1의 값들을 적용하여 모의실험 한 결과가 그림 6에 보이고 있다. 대략 1[μsec]의 짧은 시간동안 RCD 스너버의 D_S를 통해서 누설인덕터에 저장된 에너지가 스너버 커패시터 C_S로 전달되는 것을 볼

수 있다. 스너버 커패시터의 전압 v_C는 나머지 구간 동안 RC방전을 하고 있다. 자화 인덕터의 전류 i_M이 영이 되면서 스위치 전압 v_{SW}는 진동현상을 보이는데 이는 트랜스포머의 일차측 인덕턴스와 스위치의 출력 커패시턴스 사이의 기생공진에 의한 현상이다.

그림 7은 제안된 회로의 모의실험 파형으로 트랜스포머 권선 N_3와 트랜스포머 권선 N_1과의 비를 식 (3)을 이용하여 103 : 100으로 선정하였다. 이 그림을 보면 누설인덕터에 흐르는 전류의 모양이나 자화 인덕터에 흐르는 전류의 모양은 같다. 이는 스위치의 온 오프에 따라서 누설 인덕터와 자화 인덕터는 같은 방향의 같은 전류가 흐른다는 것을 말한다. 즉, 스위치 온 시 저장된 에너지가 스위치 오프 시 이차측으로 전달된다.

턴수비의 관계를 알기 위해서 그림 8은 N_3 : N_1 = 101 : 100으로 선정한 경우이다. 이 경우 누설인덕터에 걸리는 전압이 너무 작아서 영까지 떨어지지 못하고 있다. 반면에 그림 9는 N_3 : N_1 = 110 : 100으로 선정한 경우인데 누설인덕터에 걸리는 전압이 커서 누설 인덕터의 전류가 자화 인덕터의 전류보다 커진 경우이다. 또한, 스위치 오프 시 누설 인덕터의 전류가 먼저 영으로 감쇠한다. 이 경우도 에너지를 이차측으로 전달하는데 큰 문제가 없을 것으로 예상된다. 하지만 일차측 전류가 커졌기 때문에 스위치와 트랜스포머에서의 손실이 커진다. 또한 스위치와 트랜스포머의 전류정격도 커지므로 설계 시 주의해야 한다.

5. 실험결과

이상의 결과를 확인하기 위해서 15[V], 6[A]의 출력을 갖는 SMPS를 그림 10과 같이 제작하였다. 입력전원은 220[V] ±15[%]를 기준으로 설계를 하였고 두드러진 효율개선효과를 확인하기 위해서 출력을 크게 정했다. 설계된 트랜스포머의 권선비는 35[T] : 4[T]이고 제안된 방식의 권선비는 식 (3)을 통해서 36[T] : 4[T]으로 결정했다. 또한 식 (3)을 벗어난 조건으로 37[T] : 4[T]을 또 하나 정해서 비교하였다.

입력전력은 Power Meter(HIOKI, 3196)로 측정하였고 출력전압과 전류는 Fluke 멀티미터로 측정하였다. 그림 11은 3차권선 없이 RCD 스너버를 적용한 경우와 제안된 회로의 각 스위치 전압을 보이고 있는데 각 전류는 측정하기가 어려워서 생략했다.

그림 12는 세 가지 경우에 대해서 효율을 측정한 데

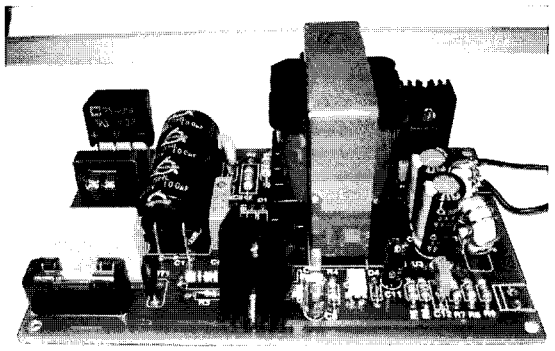
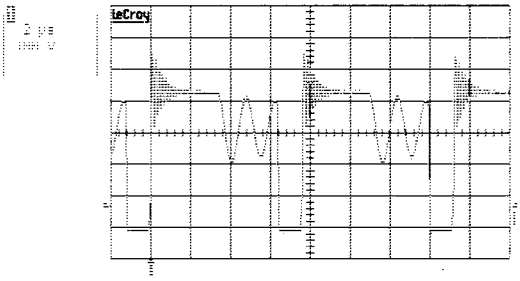
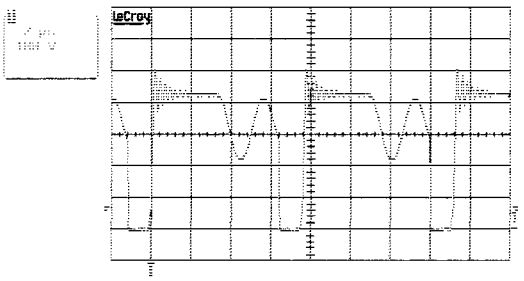


그림 10 제작된 SMPS의 사진
Fig. 10 Photograph of SMPS manufactured



(a) Switch voltage of RCD snubber method



(b) Switch voltage of the proposed circuit

그림 11 각 경우의 스위치 전압(100V/div, 2μ s/div)
Fig. 11 Switch voltage of each cases (100V/div, 2μ s/div)

이터인데 대략 80~85[%]의 효율을 가진다. 이중 3차 권선이 36[T]인 경우가 RCD 스너버를 사용한 경우보다 1[%] 정도 효율향상특성을 갖는 것을 확인할 수 있다. 반면에 3차 권선을 너무 많이 감으면 오히려 RCD 스너버를 사용하는 경우보다 효율이 2[%] 감소했다. 따라서 식 (3)의 범위 내의 데이터를 사용해야만 원하는 결과를 얻을 수 있다.

참고로 표 2는 부하별 측정 데이터로 각 경우에 출

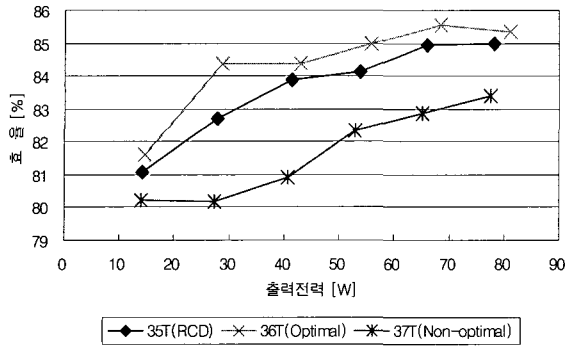


그림 12 효율측정치
Fig. 12 Efficiency measurement values

표 2 각 경우의 측정된 데이터
Table 2 Measured data of each cases

35T(RCD)			36T(Optimal)			37T(Non-optimal)		
Pin[W]	Vo[V]	Io[A]	Pin[W]	Vo[V]	Io[A]	Pin[W]	Vo[V]	Io[A]
17.70	14.95	0.96	18.10	15.23	0.97	17.60	14.86	0.95
33.60	14.94	1.86	34.10	15.22	1.89	34.10	14.86	1.84
49.30	14.93	2.77	50.80	15.20	2.82	50.30	14.85	2.74
63.90	14.93	3.60	65.60	15.19	3.67	64.40	14.85	3.57
77.80	14.92	4.43	80.20	15.18	4.52	78.60	14.84	4.39
92.10	14.91	5.25	95.20	15.16	5.36	93.00	14.83	5.23

력전압은 부하변동에도 15[V]에 잘 제어되고 있음을 보여주고 있다. 여기서 각 경우별 약간의 오차는 각 경우의 SMPS를 따로 세 대를 만들었기 때문이다.

따라서 이 실험결과를 토대로 분석해보면 제안된 방식이 효율개선에 도움을 준다는 것을 알 수 있다.

6. 결 론

본 논문에서는 고효율 전원회로를 구성하기 위한 방안으로 새로운 방식의 에너지 전달방식을 가지는 플라이백 컨버터를 제안하였다. 기존의 플라이백 컨버터는 누설인덕터에 저장된 에너지를 저항으로 소모시켜서 효율저하를 가져왔다. 하지만 제안된 방식에서는 누설인덕터에 저장된 에너지조차 이차측으로 전달하고 있기 때문에 최상의 효율을 가지는 전원회로를 구성할 수 있을 것으로 판단된다. 이를 확인하기 위해서 PSpice를 이용하여 모의실험을 한 결과 앞에서 제안하고 동작을 알아본 내용이 잘 일치하고 있음을 알 수 있었다. 또한 90[W] 출력의 SMPS를 각각 세 대를 직접 제작하여 성능을 비교해본 결과 확실한 효율개선효과를 확인할 수 있었다.

이 논문은 2006년 남서울대학교 학술연구비 지원에 의해서 연구되었음

참 고 문 헌

[1] 정용채, "절연형 SMPS의 종류 및 동작원리", 월간 전자부품, 2005년 5월호, pp.118-125.
[2] 전자기술연구회 편, "전원회로 설계 마스터", 도서출판 기문사, 2002년 4월.
[3] Keming Chen, Ahmed Elasser and D. A. Torrey, "A Soft-Switching Active Snubber Optimized for IGBTs in Single Switch Unity Power Factor Three-Phase Diode Rectifiers", IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 10, pp. 446-452, Jul., 1995.
[4] Jagjitpati Shukla and B. G. Fernandes, "A Novel Active Resonant Snubber for Single Switch Unity Power Factor Three-Phase Diode Rectifiers", IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference, Vol. 4, pp. 3818-3823, Jun., 2004.
[5] M. H. Ryu, J. W. Baek, J. H. Kim, D. W. Yoo, B. D. Min and G. H. Rim, "Boost Converter with Low-Loss Snubber Circuit", KIPE 2004 Power Electronics Annual Conference, Vol. 2, pp. 700-703, Jul., 2004.
[6] Ki-Sik Won and Tae-Young Ahn, "A Study on Active Clamp DC-DC Converter Using Digital Control", KIPE 2004 Power Electronics Annual Conference, Vol. 2, pp. 807-810, Jul., 2004.
[7] 퀴안 진룡, 웽 다 에프, (QIAN, Jinrong, WENG, Da, F.) "플라이백 컨버터를 위한 누설에너지 회복 시스템과 누설에너지 회복방법", 대한민국특허, 특2002-0074203. (PCT/EP2001/13306)

저 자 소 개

정용채(鄭龍采)

1966년 2월 28일생. 1989년 한양대학교 전자공학과 졸업. 1991년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(석사). 1995년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(공박). 1995년 ~ 1999년 LG전자 홈어플라이언스연구소 선임연구원. 1999년 ~ 현재 남서울대학교 전자공학과 부교수. 당 학회 편집위원.