

박형 자기소자를 이용한 공진형 직류/직류 컨버터의 설계·제작 및 평가

고지명, 최병조, 차헌녕
경북대학교 전자공학과

Design, Implementation and Evaluation of Resonant DC/DC Converter Using Low-Profile Magnetic Device

Jiemyung Ko, Byungcho Choi, Honnyong Cha
Kyungpook National University

ABSTRACT

This paper presents theoretical and practical details about the design, implementation, and performance of a series resonant dc-to-dc converter using planar magnetics. Result of sinusoidal analysis are used to predict the voltage gain and conversion efficiency. The performance of a prototype converter is presented including the efficiency measurement and theoretical loss breakdown.

1. 서론

최근 급속도로 발전하고 있는 전자기기의 소형, 경량화 추세에 따라 전원장치의 집적화 및 고효율화를 통한 소형화 기술의 수요가 증가하고 있다. 따라서 전자기기의 높이와 모양에 큰 영향을 주지 않는 컨버터 제작기술이 필수적이다. PCB(Printed Circuit Board) 변압기는 여러 층의 동판을 나선형 권선(Spiral Winding)모양으로 애칭시켜 박형 자기코어를 결합하여 제작함으로써 박형 컨버터의 제작을 가능하게 한다.

본 논문에서는 PCB변압기를 이용한 공진형 DC/DC 컨버터의 설계, 제작 및 평가를 다룬다. 일반적인 자기소자는 자성체로 된 코어에 여러 층의 권선을 감아 제작되기 때문에 필연적으로 박형 설계를 어렵게 한다. 이를 해결하기위해 본 논문에서는 PCB권선과 박형 자기코어를 이용하였다. 전체회로 구성은 LC 공진탱크로 구성된 직렬 공진형 하프 브릿지 컨버터를 채택하였고, 고주파 스위칭을 구현하였다. 또한 컨버터의 정현파 해석(Sinusoidal Analysis) 및 입력 임피던스 분석 (Input Impedance Analysis)과 각 소자의 도통손실

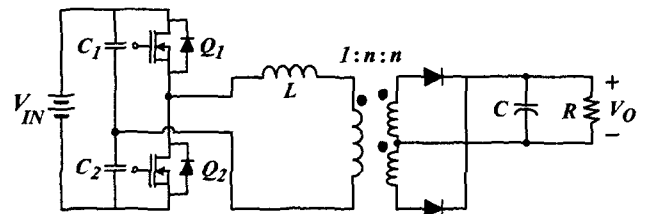


그림 1. 직렬 공진형 Half-bridge DC/DC 컨버터
Fig 1. Series resonant half-bridge dc-to-dc converter

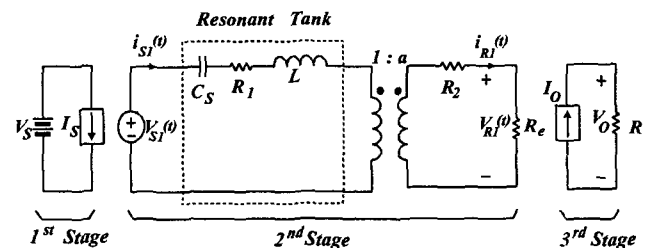


그림 2. 컨버터의 정현파 해석을 위한 등가 회로
Fig 2. Equivalent circuit model for sinusoidal analysis of converter

(Conduction Loss)을 분석하여 전체 컨버터의 전력 손실을 분석하였다. 이 분석을 통해 실제 실험실형 컨버터의 제작 없이도 설계자가 원하는 사양으로 컨버터의 전체효율을 계산하여 예측함으로써 보다 편리하게 컨버터를 설계, 제작 할 수 있게 하였다.

2. 직렬 공진형 Half-Bridge DC/DC 컨버터

2.1 구성 및 특징

그림 1은 본 논문에서 채택한 DC/DC 컨버터는 하프 브릿지 공진 인버터(Inverter)와 LC공진 탱크(Tank), 승압형 센터 탭 트랜스포머(Center-tap Transformer) 그리고 정류 회로로 구성되어 있다.

표 1. 정현파 해석의 회로 변수와 파라미터
Table 1. Circuit variables and parameter

	Expressions
First stage	$V_{I1} = \frac{V_{IN}}{2}, \quad I_{I1} = \frac{2I_{S1}}{\pi} \cos \varphi_S$
Second stage	$v_{S1}(t) = \frac{4V_{I1}}{\pi} \sin \omega_S t$ $i_{S1}(t) = i_{S1} \sin(\omega_S t - \varphi_S)$ $v_{R1}(t) = V_{R1} \sin(\omega_S t - \varphi_R)$ $i_{R1}(t) = i_{R1} \sin(\omega_S t - \varphi_R)$ $R_e = \frac{8}{\pi^2} R$
Third stage	$I_O = \frac{2}{\pi} I_{R1}, \quad R = \frac{V_O}{I_O}$

LC 공진 탱크의 구성은 별도의 커패시터 추가 없이 공진 인버터의 전압 분배 커패시터를 이용하였다.^[1] 이로 인해 추가적인 공진 커패시터에 의한 컨버터의 전력손실을 감소 시켰으며, 소자의 수를 줄여 보다 작은 크기의 컨버터 제작을 구현하였다.

2.1 DC/DC 컨버터의 정현파 해석

그림 2는 정현파 해석을 위한 전체 등가회로 모델이다. 여기서 C_S 는 직렬 공진 커패시터이다. LC 직렬 공진 탱크의 입력은 구형파의 기본파 성분만을 고려하였고, 부하는 출력단의 정류 다이오드와 필터 커패시터를 등가저항 (R_e)로 대신 하였다.^{[2][3]}

표 3은 정현파 해석의 등가회로에 관련된 변수와 전압, 전류원의 표현식이다. 그리고 DC/DC 컨버터의 전압 전달비는,

$$\begin{aligned}
 M &= \frac{V_O}{V_{IN}} \\
 &= \left(\frac{V_{I1}}{V_{IN}}\right) \left(\frac{V_{S1}}{V_{I1}}\right) \left(\frac{V_{R1}}{V_{S1}}\right) \left(\frac{I_{R1}}{V_{R1}}\right) \left(\frac{I_O}{I_{R1}}\right) \left(\frac{V_O}{I_O}\right) \\
 &= 0.5 \left| \frac{1}{X + jY} \right|
 \end{aligned}$$

이다. 여기서,

$$X = 1$$

$$Y = \frac{LC_S \omega_S^2 - 1}{R_e C_S \omega_S}$$

로 정의되며, 이러한 전달 함수는 컨버터의 설계에 대한 정보를 포함하고 있다. LC 직렬 공진 탱크의 L 과 C_S 는 각각 $1.58 \mu H$ 와 $44 nF$ 으로 설계되었다.

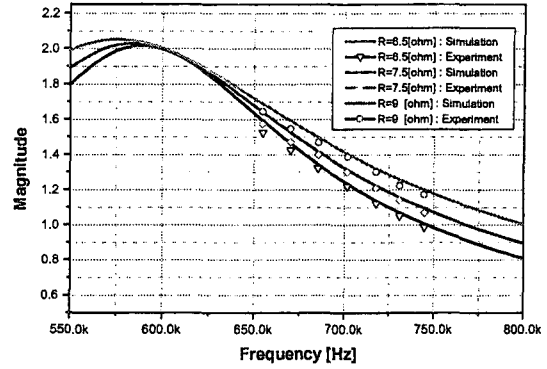


그림 3. 스위칭 주파수에 따른 전압 이득
Fig 3. Voltage gain as switching frequency changes

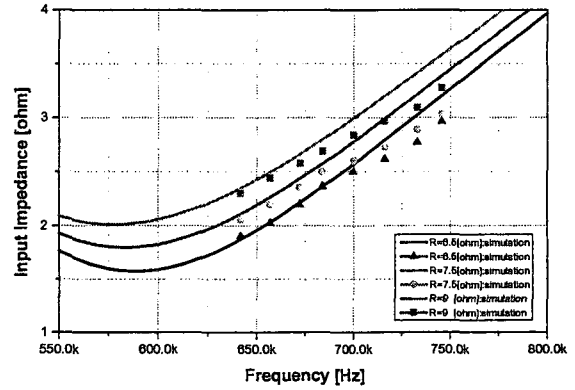


그림 4. 스위칭 주파수에 따른 입력 임피던스
Fig 4. Input impedance as switching frequency changes

그림 3은 이러한 직렬 공진 탱크를 이용한 DC/DC 컨버터의 전압 전달 특성을 PSpice로 시뮬레이션 한 결과와 실험 결과를 함께 나타낸 그림이다. 전압 전달비가 최대인 공진점을 중심으로 스위칭 주파수가 증가하거나 감소함에 따라 전압 전달비는 낮아지고, 부하 저항이 커질수록 전압 전달비는 증가하는 것을 알 수 있다. 따라서 주파수를 제어함으로써 출력 전압을 일정하게 유지시킬 수 있다. 실험 결과 전압 전달 곡선은 스위칭 손실과 변압기와 인덕터의 전도손실, 그리고 정류 다이오드의 전압 강하에 의해 시뮬레이션 결과보다 조금 낮게 측정되었지만 거의 일치함을 알 수 있다.

공진 탱크의 입력 임피던스는 공진 커패시터 C_S 와 인덕터 L , 그리고 등가저항 R_e 로부터 구해질 수 있다.^[4] 그림 4는 스위칭 주파수에 따른 입력 임피던스를 PSpice로 시뮬레이션 한 결과와 실험결과이다. 스위칭 주파수가 커질수록 탱크에 흐르는 전류 파형이 왜곡되어 정확한 정현파라 할 수 없다. 이로 인해 부하저항이 커질수록 다소 차이를 보이고 있지만 동작 범위에서 유사함을 알 수 있다. 공진주파

수(f_0)는 주파수 관계식에 의해,

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{C_S L}} = 599.7\text{kHz}$$

로 정의된다. LC 직렬공진의 특성상 공진주파수 보다 큰 구간에서 ZVS동작이 된다. 동작 스위칭 주파수는 입력전압 범위와 출력전압을 고려하여 Gain곡선의 1.6배에서 1.2배 되는, 즉 650kHz에서 750kHz 되는 구간에서 결정한다.

스위칭 주파수가 높아지고 부하저항이 커질수록 입력 임피던스가 커지는 것을 볼 수 있다. 이로써 고주파 스위칭을 함으로써 변압기의 1차 측에 흐르는 순환 전류를 줄일 수 있다.

3. 컨버터의 전력 손실

컨버터의 전체 효율을 계산하기 위해서는 회로 내부의 전력손실을 정확히 계산하여야 한다. 손실은 크게 하프 브릿지 공진 인버터와 공진 탱크, 변압기 및 정류다이오드로 예상 할 수 있다. 스위칭 전원장치 손실은 MOSFET과 다이오드에서 발생하는 스위칭 손실과 회로 내부의 저항에 의해 발생하는 전도손실, 변압기와 인덕터에서 발생하는 코어손실 그리고 커패시터의 내부저항에 의한 손실로 나눌 수 있다. 각 소자에 흐르는 전류는 정현파라 두고 계산되어지며, MOSFET의 소모 전력은 식 (1)과 같이 계산 되어진다.

$$P_{Q1} = \frac{1}{T} \int_0^T I_{Q1}^2 \cdot R_{DS(ON)} dT = I_{Q1-rms}^2 \cdot R_{DS(ON)} = P_{Q2} \quad (1)$$

$$I_{Q1-rms} = \frac{I_{pk}}{2} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{I_{pk}}{\sqrt{2}}, \quad \frac{I_{pk}}{\sqrt{2}} = I_{R-rms} \quad (2)$$

$$P_{loss} = 2I_{Q1-rms}^2 \cdot R_{DS(ON)} \quad (3)$$

스위치 전체에서 소모되는 전력 손실은 식 (3)과 같이 계산된다. 변압기와 인덕터에 사용된 코어의 손실을 측정하기 위해서 TDK사에서 제공된 코어의 자속밀도(Flux Density)에 따른 손실 그래프를 참조 하였다. 실험에 사용한 코어는 TDK사의 PC40RM8Z를 사용했으며, 코어의 Ae(Cross-section area)와 Window area를 통해 Area-product를 계산하였다. 코어의 자속 밀도는 식 (4)에 의해서 계산된다.

$$B_M = \frac{V_{out} \times T_{on}}{N \times A_e} [T] \quad (4)$$

계산된 자속 밀도와 Area-product를 이용해 코어 손실 그래프를 참조하면 변압기의 와 인덕터의 코어 손실을 구 할 수 있다. 코어 내부의 권선은 4[oz]의 동판을 사용

하였고, 권선 수는 자속밀도와 스위칭 주파수를 고려하여 정한다. 권선 수는 식 (4)와 같은 방법으로 구한다. 그리고 권선의 표면효과(Skin effect)를 고려하여 전체 인덕터와 변압기에서 소비되는 전력손실을 계산하였다. 그림 5는 변압기의 2차측 권선을 HP4194A로 측정된 주파수에 따른 표면효과(Skin effect) 그래프이다.

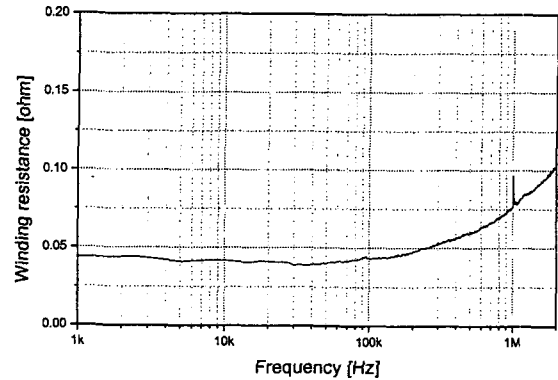


그림 5. 권선의 표면 효과
Fig 5. Skin effect

커패시터에서 소모되는 전력은 흐르는 전류와 커패시터 내부저항(esr)측정 함으로써 쉽게 계산되어진다. 정확한 계산을 위해 커패시터 내부저항(esr) 값의 정확한 측정과 작은 내부저항을 갖는 커패시터 선택이 대단히 중요하다. 정류 다이오드는 Forward voltage drop이 0.4 V인 Schottky Diode (IN5822)을 사용하였으며, 다이오드에서 소모되는 전력손실은 다음과 같이 계산 되어진다.

$$P_{D1-avg} = \frac{1}{T} \int_0^T I_{D1} \cdot V_D dT = V_D \cdot I_{D-avg} \quad (5)$$

여기서

$$I_{D1-avg} = \frac{1}{\pi} \cdot I_{pk}$$

$$I_{pk} = \sqrt{2} \cdot I_{rms}$$

$$I_{rms} = 1.11 \cdot I_0$$

와 같이 계산 할 수 있다.

지금까지의 결과로부터 직렬 공진형 하프 브릿지 DC/DC 컨버터의 효율 분석을 위해 PSpice 시뮬레이션과 이론적 계산 통해 수행하였다.

4. 효율 비교 분석

앞서 논의된 컨버터의 효율 평가를 위해 표 2와 같은 설계 사양으로 30W급 공진형 DC/DC 컨버터 회로를 제작하였다. 그림 6은 제작된 컨버터의 스위치 전압(V_{DS})과 탱크의 입력 전류(I_C), 다이오드에

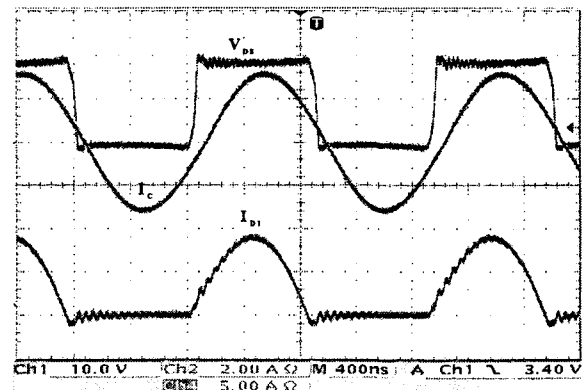
표 3. 컨버터의 소자별 전력손실
Table 3. Each component power loss of converter

전력손실 측정 부분	Name		Power Loss	전력 손실률[%]
MOSFET	IRF3415	$R_{ds(on)} : 42 \text{ m}\Omega$	0.828W	2.349 [%]
공진 커패시터	Film : 44 nF	esr : 37 m Ω	0.365W	1.038 [%]
공진 인덕터	코어(TDK사 PC40RM8Z-12)	Core loss : 0.4 mW/mm ³	0.972W	2.765 [%]
	권선수: 1회	Winding resistance : 32 m Ω	0.631W	1.795 [%]
변압기	코어(TDK사 PC40)	0.4 mW/mm ³	0.972W	2.765 [%]
	일차(4oz) : 1턴	Winding resistance : 20 m Ω	0.394W	1.12 [%]
	일차(4oz) : 2턴	Winding resistance : 50 m Ω	0.172W <td 0.489 [%]	
정류 다이오드	Schottky Diode: IN5822	Forward voltage drop : 0.4 V	0.8W	2.276 [%]
필터 커패시터	MLCC : 100 uF	esr : 15 m Ω	0.013W	0.369 [%]
Total Power Loss			5.147W	14.966 [%]

표 2. 컨버터의 설계사양
Table 2. Design specification of converter

정 수	값
정격 전압	20[V]
입력전압 범위	18[V]~24[V]
출력 전압	15[V]
출력 전류	2[A]
출력 전력	30W
스위칭 주파수 범위	650[KHz]~750[KHz]

호르는 전류(I_{D1})파형이며, 그림 7은 시뮬레이션 파형 이다. 표 3은 입력 전압 20V, 부하저항 7.5[ohm], 출력 전류를 2A라 두고 컨버터의 구성 소자에 대한 전력 손실을 계산하여 도표화 한 것이다. 소자에 의한 전력손실을 세부적으로 계산함으로써, 설계자가 원하는 사양의 컨버터에 대한 효율 분석을 손쉽게 빠르게 예측, 분석하여 제작 할 수 있게 하였다. 그림 8은 출력 전압을 15V로 일정하게 유지하면서 입력 전압이 18V, 20V, 24V에서 각각 부하전류의 변화 에 따른 효율을 실험에 의해 측정된 결과이다. 설계된 동작범위 내에서 부하 전류가 커질수록 부하저항과 스위칭 주파수는 낮아져 입력 임피던스는 낮아지게 된다. 따라서 효율은 조금씩 낮아지는 것을 그림 8에 의해 알 수 있다. 또



6. 스위치 전압과 공진탱크의 전류 파형
Fig 6. Switching voltage and tank current

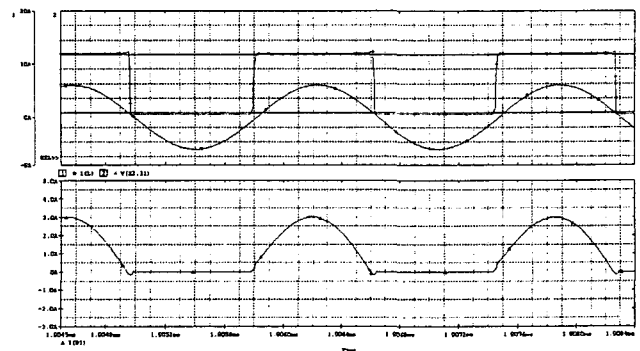


그림 7. 시뮬레이션 파형
Fig 7. Simulation waveform

한 같은 부하 전류에서 스위칭 주파수가 증가하여

참 고 문 헌

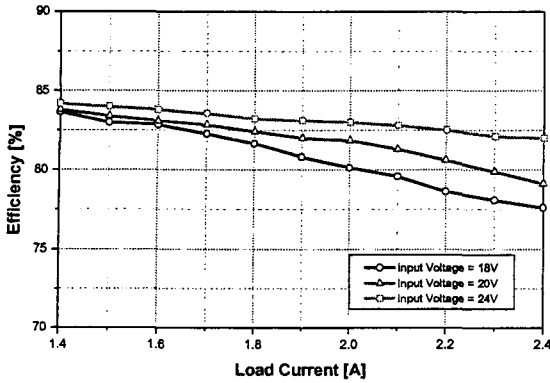


그림 8. 부하저항 변화에 따른 효율 비교

Fig 8. Comparison of efficiency as load resistance changes

- [1] Marain K. Kazimierzczuk, Dariusz Czarkowski "Resonant power converters", John Wiley & Sons, Inc, 1995
- [2] R. L. Steigerwald, "A comparison of half-bridge resonant converter topologies," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 3, pp. 174-182, Apr. 1988
- [3] Robert W. Erickson, Dragan Maksimovic "Fundamentals fo Power Electronics", Kluwer Academic-Publication, 2001, 2nd Edition.
- [4] J. Sebastian , J.A. Cobos, O. Garcia and J. Uceda, "Small-signal modelling of the half-bridge complementary-control DC to DC converter," *IV IEEE International*, 16-19 Oct. 1995

효율이 높아지는 것을 볼 수 있다. 제작된 컨버터의 출력 전력이 30W이고 입력전압이 20V일때 효율은 전체적으로 79%~83%이다. 설계에서 최대 부하저항(Lode Current : 1.4A) 에서 최대 입력 전압이 인가되었을 때 효율이 최대인 84%인 것을 알 수 있다. 이것은 설계된 동작범위 내에서 스위칭 주파수가 최대일 때 동작 조건이다. 하지만 스위칭 주파수가 너무 높아지면 스위칭 손실과 코어 손실 그리고 정류기 손실이 커져 효율이 조금 떨어지게 됩니다. 표 3에 의한 이론값과 실제 측정된 효율은 약 1%~4%정도 차이가 난다. 그 이유는 각 소자의 미세한 측정오차와 작은 출력 전압으로 인해 상대적 인 손실비가 크기 때문이라 판단된다.

5. 결 론

본 논문은 30W급 직렬 공진형 DC/DC 컨버터의 정현파 해석과 각 소자에서 발생하는 전력 손실을 이론적인 계산을 통해 실제 실험실형 컨버터와 비교 분석 하였다. 이를 통해 이론적인 효율 분석이 실제 제작된 컨버터의 효율과 유사함을 검증 하였다. 이로써 표 3과 같이 각 소자의 효율 특성을 도표화를 이용함으로써 컨버터 제작에 기술에 능숙하지 못한 설계자라도, 손쉽고 빠른 효율 분석과 컨버터 제작에 이용 될 수 있을 것으로 예상된다.

이 논문은 대학 IT연구센터 육성지원사업의 연구결과로써 HY-SDR연구센터의 연구비 지원으로 수행되었습니다.