

비접촉 전원장치에 적용한 직·병렬 공진형 DC/DC 컨버터의 특성해석

황 계호*, 이 영식*, 방 덕제*, 문 인호*, 남 승식**, 배 영호**, 김 동희***
 (*주)신성이엔지 기술연구소*, 경일대학교**, 영남대학교***

A Characteristic Analysis of the Series-Parallel Resonant type DC/DC Converter for Contactless Power System

Gye-Ho Hwang*, Yeung-Sik Lee*, Deok-Je Bang*, In-Ho Moon*,
 Seung-Sik Nam**, Young-Ho Bae**, Dong-Hee Kim***

Shinsung ENG Co. Ltd, Institute of Technology*, Kyungil University**, Yeungnam University***

Abstract - In this paper, with loosely coupled transformer series-parallel resonant type DC/DC converter is analyzed. To get more efficient operating mode of the series-parallel resonant type DC/DC converter, theoretical analysis using normalized parameters are accepted. The proposed converter must be operated in Pulse Frequency Modulation(PFM) switching pattern for the Zero Voltage Switching(ZVS) operation. According to PFM control method, the output voltage of the proposed circuit can be controlled.

1. 서 론

세계적으로 FPD(Flat Panel Display)의 수요가 급격히 증가에 힘입어 국내·외 FPD 신규 투자 규모가 대만 및 일본 등 아시아 국가를 중심으로 신규투자가 확대되어 반도체 생산 라인 증설과 새로운 장비의 개발이 요구되고 있다. 이에 따른 반도체 장비의 개발이 진행되고 있으며, 각 반도체 자동화 장비의 필수요소인 전원장치에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다.

이에 반도체 자동화 장비분야는 특수한 조건을 만족해야 함은 물론 클린룸에 청정도 레벨(일반적으로 미국연방 규격 209D와 SEMI Standard(Semiconductor Equipment and Materials International Standard))을 항상 유지해야 하므로, 반도체 자동화 물류 장비의 필수 모듈인 Wafer Stocker 및 LCD(Liquid Crystal Display) Stocker내의 로봇 구동용 AC Servo 모터의 전원 공급 장치로 기존에는 접촉식 전원 공급 장치인 긴 Power Cable 또는 Brush Type의 Power Rail을 사용함에 따라, 길게 늘어진 Power Cable의 움직임에 의해 Particle이 발생한다. Power Rail의 경우 Brush 와 Bus Bar 간의 마찰로 인한 분진과 유기보수의 문제로 인하여 반도체 웨이퍼 및 LCD 생산에 막대한 영향을 주고 있다.

따라서, 본 논문은 비접촉 전원장치에 적용하기 위한 부하직렬 공진형 DC/DC 컨버터의 공진부에 공진 커패시터(C_2)를 병렬로 삽입하여 직·병렬 공진형태로 구성된 DC/DC 컨버터를 연구 대상화로로 하였으며, 회로 해석은 무차원화 파라미터를 도입하여 범용성 있게 기술하였고[3][4], 회로의 동작특성을 스위칭 주파수와 제파라미터에 따라서 각각의 특성평가를 수행하였다. 또, 특성평가를 가지고 실험 전시뮬레이션을 행하여 연구대상회로의 타당성을 검토하였다.

더욱이, 연구대상회로를 적용한 비접촉 전원장치의 시제품을 제작하여 저항부하에서의 실험을 통한 출력전압 제어와 이론 해석의 정당성을 입증하고자 한다.

2. 직·병렬 공진형 DC/DC 컨버터

2.1 비접촉 전원장치

그림 1은 비접촉 전원장치의 시스템 블록다이어그램을 보여주고 있다. 비접촉 전원장치는 크게 1차측 전원 공급 장치, 2차측 전원 공급 장치, Inductive Coupler 장치로 구성되는 것을 알 수 있다. 그림 1에서 보듯이, 광모뎀을 통하여 2차측 전원 공급 장치인 출력 전압이 1차측 전원 공급 장치에 의해 제어됨을 알 수 있다. 여기서, 비접촉의 의미는 고정부(1차측 전원 공급 장치와 Track)와 이동부(Coupler, 2차측 전원 공급 장치) 사이에 변압기 원리를 가지는 Inductive Coupler가 물리적인 접촉을 하지 않는 것을 말한다. 즉, 1차측 전원 공급 장치와 2차측 전원 공급 장치가 절연이 되어 있어 어느 한 전원 공급 장치가 불안정하더라도 다른 한 전원 공급 장치에 영향을 미치지 않는 장점을 가진다. 여기서, Inductive Coupler는 air gap을 갖는 변압기 형태이다. 또 다른 큰 장점은 비접촉 전원장치는 주로 반도체 생산 공정에 사용되므로, 접촉 전원장치의 일종인 트롤리 구동 전원장치에 비해 아주 현저하게 파티를 발생을 줄일 수 있다는 점이다.

그림 1에서 보듯이 1차측 전원 공급 장치는 세부적으로 3상 입력부와 정류부, 공진형 컨버터부로 나뉘어지고, 2차측 전원 공급 장치는 역회복이 빠른 정류부와 회생 전력 소모부, 부하로 나누어질 수 있다. Inductive Coupler 장치는 Power Track과 Coupler로 나눌 수 있다.

비접촉 전원장치는 실부하(Stocker or Crane)가 유도 성 성분을 가지는 모터이므로 기동 및 주행, 정지시, 발생하는 전압의 변동 때문에 2차측 전원 공급 장치에서는 일정하게 출력전압을 유지해야 한다. 이렇게 출력전압을 일정하게 유지하기 위해서는 1차측 전원 공급 장치인 직·병렬 공진형 DC/DC 컨버터에서 출력 전압을 제어하여야 한다.

그림 2는 제어 스위칭 패턴을 보여 주고 있다. 그림 2에서 보듯이 일반적으로 DC/DC 컨버터의 출력전압을 제어하는 방법으로는 Pulse Width Modulation(이하 PWM로 칭함) 제어방법과 Pulse Frequency Modul-

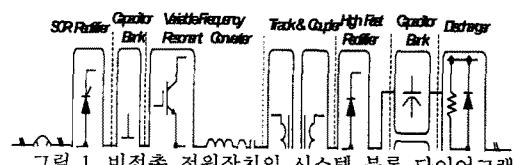


그림 1. 비접촉 전원장치의 시스템 블록 다이어그램

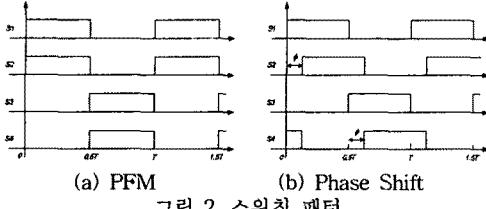


그림 2. 스위칭 패턴

ation(이하 PFM로 칭함) 제어방법, Phase Shift(이하 PS로 칭함) 제어방법이 있다. 본 논문에서는 PFM 제어방법을 사용하여 출력전압을 제어하였다.

2.2 회로 해석

그림 3은 풀 브릿지 형태를 갖는 부하직렬 공진형 DC/DC 컨버터의 공진부에 부하와 병렬로 C_{r2} 를 삽입한 직·병렬 공진형 DC/DC 컨버터를 보여 주고 있다. 그림 2에서 보는 바와 같이 직렬 공진형 컨버터는 부하전류의 경로에 직렬로 공진회로가 구성되므로 순환전류가 존재하지 않고 부하전류에 비례하는 공진전류가 흐르는 장점을 갖지만, 출력전류가 감소하면 고조파의 필터링이 감소되는 단점을 가지고 있다. 특히, 경부하 및 무부하에서 주파수 변화에 따른 입출력 전압계인 특성이 줄어들지 않아 제어가 불가능한 단점을 가진다. 병렬 공진형 컨버터는 무부하에서 전부하에 이르기까지 제어 가능한 장점을 가지며 병렬 공진형 커�패시터는 전압원으로 동작한다. 그러나 부하변동에 영향을 받지 않는 동작을 얻기 위해서는 병렬 커�패시터가 상당히 커야 한다. 이로 인해 순환전류가 상당히 커지는 단점이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위한 회로구성은 E_d 은 전원이고, $S_1 \sim S_4$ 는 자기소화 기능을 가진 스위칭 소자로 MOSFET, IGBT 등이 적용 가능하고, C_{r1} , C_{r2} , 및 L_r 은 공진형 커�패시터와 리액티이며, L_o , C_o 는 평활용 리액터 및 커�패시터이다. 그리고 $D_1 \sim D_4$ 는 회생용으로 사용되는 역병렬 다이오드이고, $D_5 \sim D_8$ 은 브리지로 구성된 정류용 다이오드로 역회복 시간이 빠른 고속 다이오드를 사용한다.

그림 4는 스위칭 주파수에 따른 스위칭 소자($S_1 \sim S_4$)의 구동신호와 이에 따른 공진전류(i_{r1})의 정성적 과정을 나타내고 있다. 여기서 스위칭 소자(S_1, S_2)와 스위칭 소자(S_3, S_4)는 데드타임을 갖고, 상보적으로 구동하며, 구동신호의 뉴터비는 항상 50%이고, 스위칭 주파수(f_{sw})와 공진주파수(f_r)의 비에 의해, 용량성, 저항성, 유도성 패턴으로 동작하며, 본 논문에서는 스위칭 소자를 온할 경우 ZVS(Zero Voltage Switching)기능을 하고, 부하의 변화에 따라 출력전압 제어가 용이한 유도성 패턴인 스위치 주파수가 공진주파수보다 높은 경우에 스위치의 초기전류가 부(-)가 되어 스위치 전압보다 위상이 뒤지는 패턴으로 구동하였다.

그림 3의 직·병렬 공진형 DC/DC 컨버터 회로의 동작 원리는 정(+)의 반주기에서 S_1, S_2 가 온될 경우, 공진전류는 정(+), 전원측(E_d)에서 부하로 에너지가 공

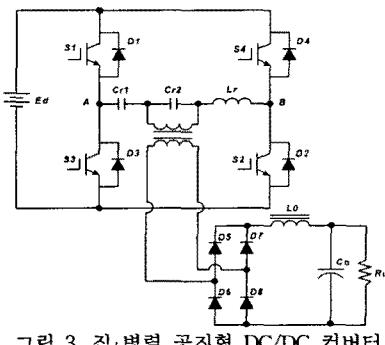


그림 3. 직·병렬 공진형 DC/DC 컨버터

표 1 동작모드

MO	Resonant part								Rectifier part				
	DE	S_1	S_2	S_3	S_4	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	D_6	D_7	D_8
1	O	O	X	X	X	X	X	X	X	O	O	O	X
2	X	X	X	X	O	O	X	X	O	X	X	O	O
3	X	X	O	O	X	X	X	X	O	X	X	O	O
4	X	X	X	X	X	X	O	O	X	O	O	X	O

* O : ON, X : OFF

표 2 무차원화 파라미터

	Reference Values	Normalized Values
Voltage	$E_s = E_d$	$v^*(z) = \frac{v(t)}{E_s}$
Current	$I_s = \frac{E_s}{Z_s}$	$i^*(z) = \frac{i(t)}{I_s}$
Power	$P_s = E_s I_s$	$p^*(z) = \frac{p(t)}{P_s}$
Impedance	$Z_s = 2\sqrt{\frac{L_s}{C_s}}$	$\lambda = \frac{R}{Z_s}$
Inductance	$L_s = L_r$	$a_1 = \frac{L_o}{L_s}$
Capacitance	$C_s = C_{r1}$	$b_0 = \frac{C_o}{C_s}, b_1 = \frac{C_{r2}}{C_s}$
Frequency	$f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_s C_s}}$	$\mu = \frac{f_{sw}}{f_s} = f_{sw}(2\pi\sqrt{LC})$
Time	$T_s = \frac{1}{f_{sw}}$	$z = \frac{t}{T_s} dz = \frac{dt}{T_s}$

<Remarks>

f_s : Resonant Frequency of Converter

f_{sw} : Switching Frequency of Converter

T_s : Operating Period of Converter

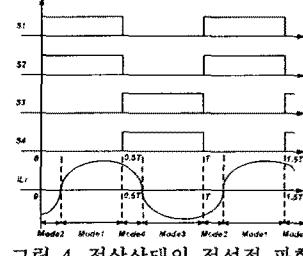


그림 4. 정상상태의 정성적 과정

급되며, 일정시간 후 직·병렬 공진회로에 의해 다시 전원측(E_d)으로 에너지가 환원되는 루프가 형성된다. 이상은 정(+)의 반주기에 관해서만 서술하였고, 다음 반주기는 S_3, S_4 가 터·온 될 경우이며, 이것은 S_1, S_2 가 터·온되는 동작원리와 같은 상태로 동작 되며, 이에 대한 동작모드는 표 1에 보여주고 있다.

표 1의 동작모드에 따른 각 모드별 회로 상태방정식을 정량화를 부여하기 위해 표 2에 나타낸 무차원화 파라미터를 도입하여 범용성 있게 나타내었다. 4개의 모드 중 모드 1의 무차원화 상태 방정식은 식(1)과 같다.

$$\frac{dX^*}{dz} = A^* \cdot X^* + B^* T, U^* \quad (1)$$

여기서, $X^* = [i_{r1}^*(z) i_{r2}^*(z) V_{cr1}^*(z) V_{cr2}^*(z) V_{o1}^*(z)]^T$, $U^* = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$ 이고, A^* , B^* 는 다음과 같다.

$$A^* = \frac{4\pi}{\mu} \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & sn \frac{1}{a_1} & -\frac{1}{a_1} \\ \frac{1}{4} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{4b_1} & -sn \frac{1}{4b_1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{4b_0} & 0 & 0 & -\frac{1}{4\lambda b_0} \end{bmatrix}$$

$$B^* = \frac{4\pi}{\mu} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

각 모드에 존재하는 방정식은 고차로 되고, 스위치 소자 ($S_1 \sim S_4$)의 온·오프 상태는 예측할 수는 있지만, $D_1 \sim D_4$ 의 온·오프 상태는 예측하는 것이 불가능하므로 수치 해석 시 공진전류(i_{L1})과 공진전압(V_{out})의 방향에 따라 모드를 판정하게 되며, 컴퓨터를 이용하여 수치해석을 행하였다.

2.3 특성해석

그림 5는 $a_1=100$, $b_0=100$, $b_1=1.0$ 인 경우, 무차원화 부하 제어변수(1)를 파라미터로 하여 무차원화 주파수(1)에 대한 출력전압 특성을 보여주고 있다. 즉, 부하 가변과 용량성, 저항성, 유도성 스위칭 패턴으로 가변 될 때의 출력전압 특성을 보여주고 있으며, 주파수 제어변수(1)를 저항성 패턴에서만 최대 출력 전압이 되고, 나머지 용량성, 유도성 패턴에서는 출력전압이 감소함을 알 수 있다. 또, 무차원화 부하 제어변수(1)를 점점 증가시킬 경우, 출력전압은 점점 증가하는 특성을 알 수 있다. 이것은 스위칭 패턴을 변화 시키면 출력전압의 제어가 가능함을 알 수 있다.

그림 6은 $a_1=100$, $b_0=100$, $b_1=1.0$ 인 경우, 비접촉 전원장치의 기동과도 출력전압특성을 보여주고 있다. $T_1 \sim T_4$ 는 기동과도상태 구간이며, T_4 시점 이후는 정상상태 구간임을 보여주고 있다. T_1 시점은 1차측 전원 공급 장치를 on한 시점이고, $T_1 \sim T_2$ 는 2차측 전원 공급 장치의 전압 충전을 위한 Soft charging 시간이며, $T_2 \sim T_3$ 은 2차측 전원 공급 장치가 on이 되는 시간이며, $T_3 \sim T_4$ 는 정상출력 전압으로 기동되는 시간을 나타내는 특성을 보여주고 있다.

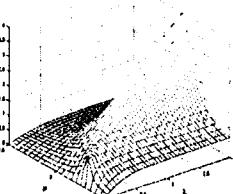


그림 5. 출력전압특성

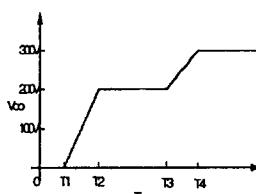


그림 6. 기동과도 출력전압특성

2.4 실험

그림 7은 실제 실험에 사용된 비접촉 전원장치의 시제품을 보여주고 있다. 그림 7에서 보듯이, 크게 1차측 전원장치와 2차측 전원장치, Inductive Coupler 장치로 나눌 수 있다. 세부적으로는 그림 1과 같은 블록선도로 3상 입력부, 3상 정류부, 공진형 컨버터부, Inductive Coupler부, 브릿지 형태의 정류부, 회생전력 소모부, 부하부로 구성되어 있다. 실험에 관한 실험 회로 정수는 표 3에 나타내었다.

그림 8은 IGBT(S_1 , S_2)의 게이트 신호 실측파형을 보여주고 있다. 그림 8에서 보듯이 S_1 , S_2 의 게이트 신호는 동상이며, 그림 8의 (a)인 최대 주파수(74.5[kHz])는 저항 부하에서, 기동시 동작되는 주파수이며, 부하가 증가할 경우, (b)인 최소 주파수(12.1[kHz])로 가변된다. 부하의 변동에 따라 주파수 변화에 의해 출력



그림 7. 시제품

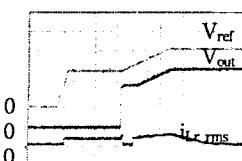


그림 9. 기동과도 출력전압파형

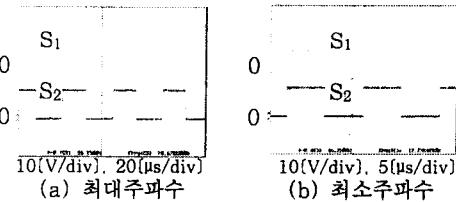


그림 8. S_1 , S_2 의 게이트 신호 실측파형

정격	
입력	3상 220[Vac]
출력 전압	300[Vdc]
스위칭 주파수	12.1[kHz]
주회로방식	직별렬 공진형 컨버터
부하	저항부하
적용 소자	IGBT(600[Vac], 300[A])
냉각 방식	강제 공냉식
코아	EE118, EI118 조합

을 제어하는 PFM제어로 동작함을 알 수 있다.

그림 9는 실험을 통해 실측한 V_{ref} , V_{out} , $i_{Lr,rms}$ 의 기동과도파형을 보여주고 있다. 그림 9에서 보듯이, $i_{Lr,rms}$ 은 공진 회로의 L_r 에 흐르는 공진전류의 rms치를 실측하였고, V_{ref} 는 출력전압의 기준 전압을 나타내고, V_{out} 은 실제 출력전압을 보여 주고 있다. V_{ref} 에 대해서 V_{out} 이 잘 추종함을 알 수 있다. 또, V_{ref} 에 대해 V_{out} 이 추종하기 위해 그림 8의 (a), (b)처럼 최대 주파수에서 최소 주파수로 가변하는 즉, 그림 5와 그림 6의 특성과 같은 PFM 제어에 의해 동작됨을 보여 주고 있다. V_{ref} 가 주어지고 V_{out} 이 추종하는데 약 5초정도 시간이 걸리는 것은 광모뎀이 동작되는 시간을 보여주고 있다.

3. 결 론

본 논문은 풀 브릿지 형태를 갖는 부하직렬 공진형 DC/DC 컨버터의 공진부에 부하와 병렬로 공진 커패시터(C_r)를 삽입한 직·병렬 공진형 DC/DC 컨버터를 연구 대상회로로 하여 회로의 동작모드 및 회로해석을 행하였다. 회로의 특성해석을 범용성 있게 하기 위해, 무차원화 파라미터를 도입하여 여러 특성평가를 실시하였다.

제안회로의 특성평가를 기초로 하여, IGBT를 이용하여 실험을 행한 실험결과와 이론해석의 경향이 일치하므로 회로해석의 정당성을 입증하였다. 또한, 비접촉 전원장치로 직·병렬 공진형 DC/DC 컨버터를 적용하였고, 부하는 저항성 부하를 사용하였으며, 전 부하에 대해 유도성 패턴으로 스위칭 하는 PFM 제어방법을 사용하여 출력전압변동이 양호하고 안정적으로 운전됨을 알 수 있었다.

향후, 본 논문의 결과를 실제 반도체 장비인 Stocker 내의 Crane에 적용하여 그 특성을 비교·검토하여 우수한 특성으로 적용 가능하리라 생각된다.

[참 고 문 헌]

- [1] Abel, E. and Third, S. M., "Contactless Power Transfer-An exercise in topology", IEEE Transactions of Magnetics, Vol.Mag-20(5), pp.1813-1815, 1984.
- [2] Yungtaek Jang and Milan M. Jovanovic, "A Contactless Electrical Energy Transmission System for Portable-Telephone Battery Chargers", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.50(3), 2003.
- [3] 황계호, 김동희 외 4명, "공진 전압 합성형 DC/DC 컨버터의 특성해석", 대한전기학회 논문지, Vol.49B(1), pp.40-47, 2000.
- [4] 황계호, 강도현, 김종무 외 5명, "TFLM에 적용한 직병렬 공진형 DC/DC 컨버터의 출력전압 제어에 관한 연구", 반도체 및 디스플레이 장비학회 논문지, Vol.4(1), pp.9-15, 2005.