

비접촉 전원장치에 적용한 LCC형 고주파 공진 DC/DC 컨버터에 관한 연구

(A Study on the LCC Type High Frequency DC/DC Converter
for Contactless Power Supply System)

황계호 · 김동희*

(Gye - Ho Hwang · Dong - Hee Kim)

요 약

본 논문은 부하직렬 고주파 공진 DC/DC 컨버터에 가변 가능한 공진커패시터를 병렬로 삽입한 LCC형 고주파 공진 DC/DC 컨버터의 특성과 설계 예를 나타내고 있으며, 또한 턴-오프시 스위칭 손실을 줄이기 위해 ZVS를 가지는 소프트 스위칭을 사용하였다. 제안 컨버터는 PFM(Pulse Frequency Modulation) 스위칭 패턴을 사용하여 동작되며, PFM 제어에 의해 제안 회로의 출력전압을 제어하였다. 병렬커패시터의 커패시턴스의 변화에 따라, DC/DC 컨버터의 분석은 일반적으로 무차원화 파라미터를 사용하여 나타내었고, 회로 동작 특성은 스위칭 주파수와 파라미터로 행하였다. 또한 본 논문은 특성평가에 의해 제안 DC/DC 컨버터의 동작 특성과 회로 설계 방법을 제시하였다. 더욱이 본 논문은 실험을 통해 이론 분석의 정당성을 입증하였다. 향후 제안한 DC/DC 컨버터는 반도체 및 FPD의 클린룸에 선형이동 시스템의 비접촉 전원장치에 적용 가능하다고 생각된다.

Abstract

This paper represents characteristics and design example of series loaded LCC type high frequency resonant DC-DC converter with variable parallel capacitor in the secondary side of inductive power transformer. In this converter, ZVS(zero voltage switching) technique is applied to reduce turn-off switching losses, and the applied converter used the PFM switching pattern to control output voltage. The operating characteristics of the proposed converter is analyzed using nomalized parameter such as switching frequency and load factor with varying the secondary parallel resonant capacitor. The results of analysis show the operating characteristics and design method of the proposed converter using characteristic values. And, the proposed converter can be applied for the contactless power supply with linear transfer system such as clean room facilities of semiconductor and Flat Panel Display.

Key Words : Resonant DC/DC converter, Inductive Coupler, FPD(Flat Panel Display)

* 주저자 : 영남대학교 전기공학과 교수
Tel : 031-788-9067, Fax : 031-788-9440
E-mail : hgyeho@yumail.ac.kr
접수일자 : 2007년 1월 29일
1차심사 : 2007년 2월 5일
심사완료 : 2007년 2월 21일

1. 서 론

최근 가정용으로 전력 용량이 적은 전동용 칫솔, 무선전화기, 전기면도기, 휴대폰 등 소형 제품에 배터리를 내장하여 사용하는 경우가 늘고 있다. 내장된 배터리를 충전하는 방법으로 전기적 접촉을 통해 에너지를 전달하는 방법을 주로 사용한다. 이러한 접촉식 충전방법은 접촉 불량으로 인한 고장이 많이 발생하며 습기가 많고, 고청정 환경에서는 사용하기 힘든 단점이 있다.

산업분야에서 세계적으로 급격한 FPD의 수요 증가에 따른 신규투자가 확대됨에 따라 반도체 생산라인 증설과 새로운 장비의 개발이 요구되고 있다 [1-2]. 이에 FPD와 반도체 물류장비의 전원장치에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다[1]. 초기 반도체 및 LCD(Liquid Crystal Display) 물류장비의 전원장치로 파워 케이블 또는 브러쉬 타입의 파워 레일을 주로 사용하였다. 그림 1은 산업분야에서 초기 적용되어진 접촉식 전원장치를 보여주고 있다. 그림 1에서 보듯이 파워 케이블은 길게 늘어진 파워 케이블의 움직임에 의해 분진이 발생하며, 파워 레일의 경우, 브러쉬와 부스바간의 마찰로 인한 분진과 서지 전압의 발생, 유지보수의 문제가 발생하는 단점을 가진다[2].

본 논문은 전원 용량이 큰 특수한 산업분야인 반도체, LCD 생산 공정에 접촉식 전원장치의 단점을 해결하기 위한 전기적 접촉이 없이 자기장을 이용한 에너지를 전달하는 비접촉 전원장치에 관한 연구를 수행하였다. 연구대상회로는 비접촉 전원장치에 적용하기 위해 부하직렬 고주파 공진 DC/DC 컨버터에 공진커패시터를 병렬로 삽입한 LCC형 고주파 공진 DC/DC 컨버터로 하였다. 회로해석은 무차원화 파라미터를 이용한 회로 특성평가 및 설계를 행하고, 또한 20[kW] 용량의 시제품을 제작하여 실험을 통한 이론해석 및 설계의 정당성을 제시하고자 한다.

2. LCC형 고주파 공진 DC/DC 컨버터

2.1 비접촉 전원장치

그림 2는 일반적인 변압기와 비접촉 변압기의 구조를 보여주고 있다. 그림 2 (a)에서 일반적인 변압기의 동작원리는 1차측 전원공급장치에 의해 1차코일 양단에 전압을 발생하여 1차 코일에 전류가 인가되면 자속이 발생하여 2차 코일에 유기전압이 발생한다. 따라서 2차 코일에 전류가 발생하여 2차측 전원공급장치에 인가된다. 일반적인 변압기는 밀 결합에 의한 높은 결합계수로 에너지 전달 효율이 좋으며, 반면에 그림 2 (b)의 비접촉 변압기는 일반 변압기보다 큰 공극에 의한 낮은 결합계수를 가지므로 에너지 전달 효율이 낮아진다. 이러한 비접촉 변압기를 적용한 다양한 고주파 공진 DC/DC 컨버터를 사용하여 에너지 전달 효율을 높이는 연구가 진행되고 있다[3-7].

그림 3은 선형 구동 시스템에 그림 2 (b)의 비접촉 변압기를 적용한 비접촉 전원장치의 블록도를 보여주고 있다. 그림 3에서 보듯이 비접촉 전원장치는 크게 1차측 전원장치, 2차측 전원장치, 비접촉 변압기인 Inductive Coupler 장치로 구성되도록 하였으며, 또한 고정부는 1차측 전원 장치와 비접촉 변압기의 일부로 구성되어 있고, 이동부는 2차측 전원장치와 비접촉 변압기의 일부로 구성되어 있음을 알 수 있다.

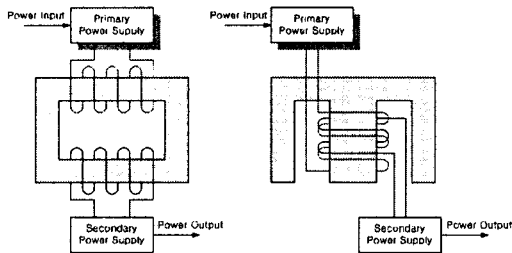
2.2 비접촉 전원장치의 출력전압 제어

그림 4는 비접촉 전원장치의 시스템 제어 블록도를 보여주고 있다. 부하인 장거리 선형 구동 시스템은 유도성 성분을 가지는 모터이므로 기동 및 주행, 정지시, 발생하는 전압 변동 때문에 비접촉 전원장치의 2차측 전원공급장치는 일정하게 출력전압을 유지해야 한다. 출력전압을 일정하게 유지하기 위해서는 1차측 전원공급장치인 고주파 공진 DC/DC 컨버터에서 출력 전압을 제어하여야 한다.



(a) 파워 케이블 (b) 파워 레일

그림 1. 접촉식 전원장치
Fig. 1. Contact Power Supply System



(a) 일반적인 변압기 (b) 비접촉 변압기

그림 2. 변압기의 구조
Fig. 2. Structure of Transformer

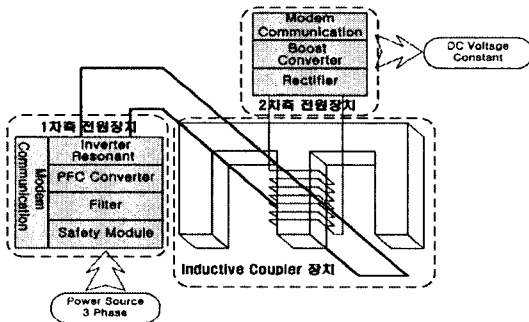


그림 3. 비접촉 변압기 적용 전원장치의 블록도
Fig. 3. Block diagram of Power supply system using Contactless Transformer

그림 4에서 보듯이 1차측 전원공급장치는 세부적으로 3상 입력부와 정류부, 공진형 컨버터부로 구성되고, 2차측 전원공급장치는 역회복이 빠른 정류부와 회생 전력 소모부, 부하로 구성하였다. 또 Inductive Coupler 장치는 파워 트래크와 Coupler로 구성하였다. 여기서 공진형 컨버터는 풀 브릿지 구조로 부하직렬 고주파 공진 DC/DC 컨버터에 공진커패시터를 병렬로 삽입한 LCC형 고주파 공진

DC/DC 컨버터 회로로 구성하였다.

본 논문에서는 풀 브릿지 구조를 갖는 LCC형 고주파 공진 DC/DC 컨버터의 출력전압 제어를 위해 주파수 제어(PFM)를 사용하여 출력전압을 제어하도록 하였으며, 또한, 스위칭 주파수(f_{sw})와 공진 주파수(f_r)의 비에 의한 스위칭 패턴은 스위칭 소자를 온할 경우 ZVS기능을 갖는 공진 주파수(f_r)보다 스위칭 주파수(f_{sw})가 높게 동작되는 유도성 패턴으로 동작되도록 하였다[8].

2.3 회로 해석

그림 5는 부하직렬 고주파 공진 DC/DC 컨버터에 공진커패시터(C_r)를 병렬로 삽입한 LCC형 고주파 공진 DC/DC 컨버터를 보여 주고 있다. 그림 5에서 보는 바와 같이 직렬 공진형 컨버터는 부하전류의

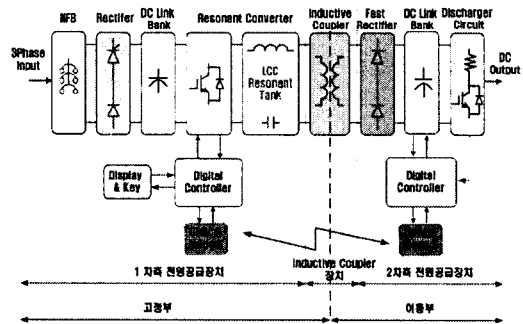


그림 4. 비접촉 전원장치의 시스템 제어 블록도
Fig. 4. System Control Block diagram of Contactless Power Supply System

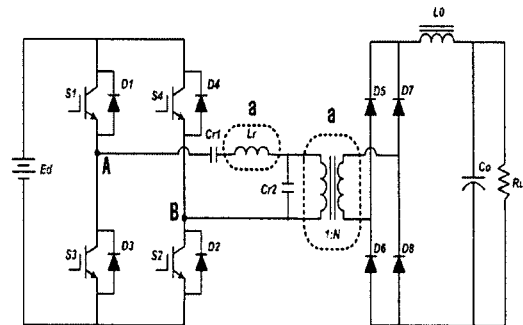


그림 5. LCC형 고주파 공진 DC/DC 컨버터
Fig. 5. LCC type high frequency resonant DC/DC Converter

경로에 직렬로 공진회로가 구성되므로 순환전류가 존재하지 않고 부하전류에 비례하는 공진전류가 흐르는 장점을 갖지만, 출력전류가 감소하면 고조파의 필터링이 감소되는 단점을 가지며, 특히 경부하 및 무부하에서 주파수 변화에 따른 입출력 전압 특성이 줄어들지 않아 제어가 불가능한 단점을 가진다. 병렬 공진형 컨버터는 무부하에서 전부하에 이르기까지 제어 가능한 장점을 가지며 병렬 공진형 커패시터는 전압원으로 동작한다. 그러나 부하변동에 영향을 받지 않는 동작을 얻기 위해서는 병렬 커패시터가 상당히 커야 한다. 이로 인해 순환전류가 상당히 커지는 단점이 있다. LCC형 고주파 공진 DC/DC 컨버터의 회로구성은 E_d 는 전원이고, S1~S4는 자기소호기능을 가진 스위칭 소자로 MOSFET, IGBT 등이 적용 가능하고, Cr1, Cr2는 공진형 커패시터이며, a는 비접촉 변압기인 Inductive Coupler 장치를 표시하며, 여기서 L_r 은 누설 인덕턴스와 자화 인덕턴스를 포함하는 공진형 리액터이다. 비접촉 변압기는 누설 인덕턴스가 크고 자화 인덕턴스가 작기 때문에 이로 인한 비접촉 변압기의 결합계수가 작으므로 에너지 전달의 비효율성이 대두가 된다. L_o , C_o 는 평활용 리액터 및 커패시터이다. 그리고 D1~D4는 회생용으로 사용되는 역병렬 다이오드이고, D5~D8은 브리지로 구성된 정류용 다이오드로 역회복 시간이 빠른 고속 다이오드를 사용한다.

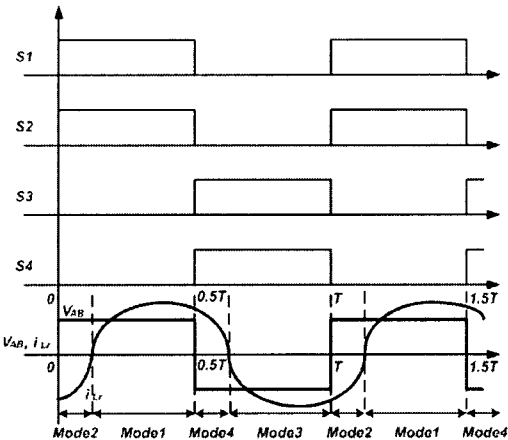
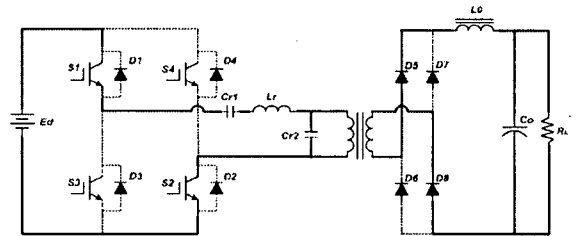


그림 6. 정상상태의 정상적 파형
Fig. 6. Generation waveform of steady state

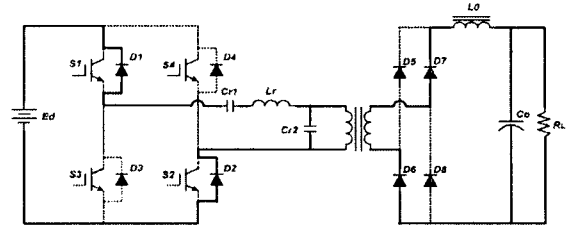
표 1. 동작모드
Table 1. Operation Mode

MODE	Resonant part								Rectifier part			
	S1	S2	S3	S4	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8
1	O	O	X	X	X	X	X	X	X	O	O	X
2	X	X	X	X	O	O	X	X	O	X	X	O
3	X	X	O	O	X	X	X	X	O	X	X	O
4	X	X	X	X	X	X	O	O	X	O	O	X

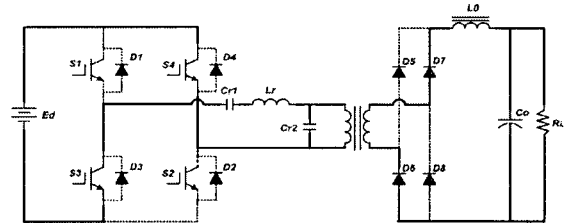
O:ON, X:OFF



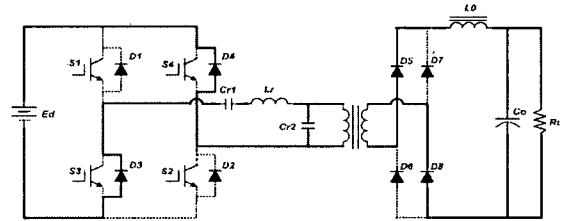
(a) 모드 1



(b) 모드 2



(c) 모드 3



(d) 모드 4

그림 7. 모드별 등가회로
Fig. 7. Equivalent Circuit of each operation mode

그림 6은 스위칭 주파수에 따른 스위칭 소자(S1~S4)의 구동신호와 이에 따른 공진전류(i_{Lr})의 정상적 파형을 나타내고 있다. 여기서 스위칭 소자(S1, S2)와 스위칭 소자(S3, S4)는 데드타임을 갖고, 상보적으로 구동하며, 구동신호의 듀티비는 항상 50[%]이고, 스위칭 주파수(f_{sw})와 공진 주파수(f_r)의 비에 의한 유도성 패턴으로 동작하도록 구성하였다.

그림 5의 LCC형 고주파 공진 DC/DC 컨버터의 동작원리는 정(+의 반주기에서 S1, S2가 온될 경우, 공진전류는 정(+, 전원측(Ed)에서 부하로 에너지가 공급되며, 일정시간 후 LCC형 공진회로에 의해 다시 전원측(Ed)으로 에너지가 환원되는 루프가 형성된다. 이상은 정(+의 반주기에 관해서만 서술하였고, 다음 반주기는 S3, S4가 턴·온 될 경우이며, 이것은 S1, S2가 턴·온 되는 동작원리와 같은 상태로 동작되며, 이에 대한 동작모드는 그림 7과 표 1에 나타내고 있다.

표 1의 동작모드에 따른 각 모드별 회로 상태방정식에 표 2의 무차원화 파라미터를 도입하여 정규화 되도록 표현하였다. 4개의 모드 중 모드 1의 무차원화 상태 방정식은 식 (1)과 같다.

$$\frac{dX^*}{dz} = A^* \cdot X^* + B^* \cdot T \cdot U^* \tag{1}$$

여기서 $X^* = [i_{Lr}^*(z) \ i_{Lc}^*(z) \ V_{cr}^*(z) \ V_{cr2}^*(z) \ V_{\alpha}^*(z)]^T$,

$U^* = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$ 이고, A^* , B^* 는 다음과 같다.

$$A^* = \frac{4\pi}{\mu} \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & sn \frac{1}{a1} & -\frac{1}{a1} \\ \frac{1}{4} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{4b1} & -sn \frac{1}{4b} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{4b0} & 0 & 0 & -\frac{1}{4\lambda b0} \end{bmatrix}$$

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

여기서 sn 은 Co , Lo 의 전압, 전류극성을 바꿔주기 위한 변수이다.

각 모드에 존재하는 방정식은 고차로 되고, 스위

치 소자(S1~S4)의 온·오프 상태는 예측할 수는 있지만, D1~D4의 온·오프 상태는 예측하는 것이 불가능하므로 수치해석시 공진전류(i_{Lr})와 공진전압(V_{cr2})의 방향에 따라 모드를 판정하게 하였다.

2.4 특성 평가

그림 8은 $a1=100$, $b0=100$, $b1=0.14$ 일 때, 무차원화 부하제어변수(λ)를 파라미터로 하여 무차원화 주파수(μ)의 변화에 대한 출력전압특성을 보여주고 있다. 그림 8에서 보듯이, $\lambda=0.5$ 일 때, 저항성 부하로 동작되는 $\mu=0.41$ 에서 출력전압이 최대치가 되며(입력 전원측에서 부하측으로 본 임피던스가 최소로 동작되는 상태), μ 의 변화에 대한 출력전압도 변화하는 것을 알 수 있다.

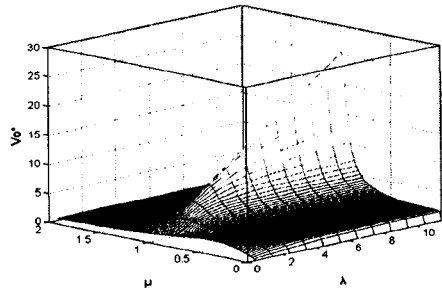


그림 8. 무차원화 부하제어변수 vs. 출력전압특성
Fig. 8. Characteristic of λ vs. V_o^*

그림 9는 $a1=100$, $b0=100$, $b1=0.14$ 일 때, 무차원화 주파수(μ)를 파라미터로 하여 무차원화 부하제어변수(λ)의 변화에 대한 출력전압특성을 보여주고 있다. 그림 9에서 보듯이, 무차원화 부하제어변수(λ)가 0.5에서 11.5까지 커질수록 출력전압은 커진다는 것을 볼 수 있고, 또한 출력전압이 1인 경우, 무차원화 부하제어변수의 변화에 따른 무차원화 주파수(μ)의 변화범위는 1.08에서 1.62가 됨을 알 수 있다. 이 특성으로 만약 사용자가 일정한 어느 한 값의 출력전압을 원하는 경우, 무차원화 부하제어변수(λ)가 일정하다고 가정하면 그림 9를 이용해서 주파수 제어를 선정하기 위한 무차원화 주파수(μ)를 결정하면 된다.

표 2. 무차원화 파라미터
Table 2. Normalized Parameter

	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	$Z_s = \sqrt{\frac{L_s}{C_s}}$	$\lambda = \frac{R}{Z_s}$
Inductance	$L_s = L r$	$a1 = \frac{L_o}{L_s}$
Capacitance	$C_s = C r1$	$b0 = \frac{C_o}{C_s}, b1 = \frac{C r2}{C_s}$
Frequency	$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_s C_s}}$	$\mu = \frac{f_{sw}}{f_r} = f_{sw}(2\pi\sqrt{LC})$
Time	$T_s = \frac{1}{f_{sw}}$	$z = \frac{t}{T_s}, dz = \frac{dt}{T_s}$

<Remarks>
 f_r : Resonant Frequency of Converter
 f_{sw} : Switching Frequency of Converter
 T_s : Operating Period of Converter

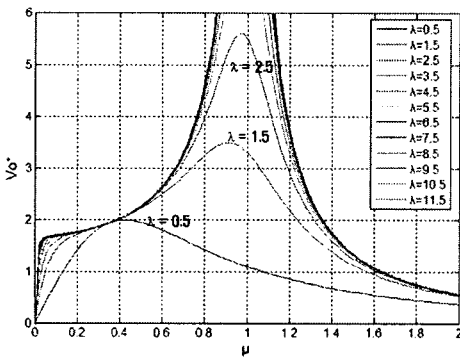


그림 9. 무차원화 주파수 vs. 출력전압특성(λ 변화)
Fig. 9. Characteristic of μ vs. V_o^* (λ 변화)

그림 10은 $a1=100, b0=100, \lambda=0.5$ 일 때, 무차원화 커패시터의 비($b1$)를 파라미터로 하여 무차원화 주파수(μ)의 변화에 대한 출력전압특성을 보여주고 있다. 그림 10에서 보듯이 부하제어변수(λ)가 0.5에서 $b1$ 인 무차원화 커패시터의 비를 0.5에서 5.0으로 증

가할 경우 출력전압특성이 증가하는 경향을 알 수 있다.

그림 11은 $a1=100, b0=100, \lambda=0.5$ 일 때 무차원화 주파수(μ)를 파라미터로 하여 무차원화 커패시터의 비($b1$)의 변화에 대한 출력전압특성을 보여주고 있다. 그림 11에서 보듯이 무차원화 부하제어변수(λ)가 0.5에서 $b1$ 인 무차원화 커패시터의 비를 0.5에서 5.0으로 증가할 경우 출력전압특성이 증가하는 경향을 보이며, 또한 무차원화 커패시터의 비가 증가할 경우, 무차원화 주파수가 0.7에서 1.0으로 증가하는 경향을 알 수 있다. 이 특성은 LCC형 고주파 공진 DC/DC 컨버터의 고유한 특성임을 알 수 있다.

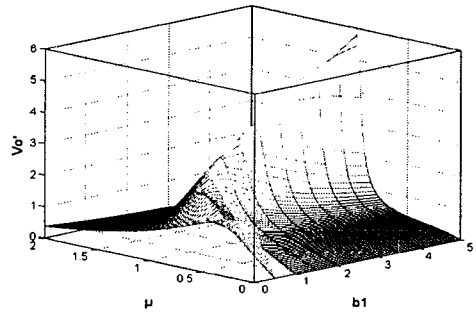


그림 10. 무차원화 커패시터 비 vs. 출력전압특성
Fig. 10. Characteristic of $b1$ vs. V_o^*

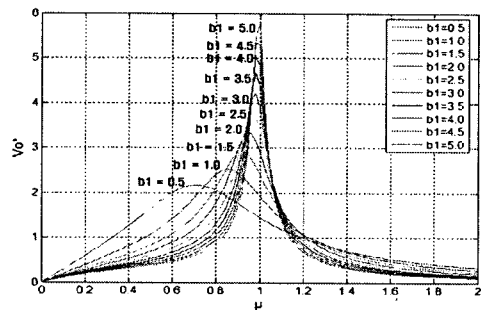


그림 11. 무차원화 주파수 vs. 출력전압특성($b1$ 변화)
Fig. 11. Characteristic of μ vs. V_o^* ($b1$ 변화)

그림 12는 $a1=100, b0=100$ 일 때, 무차원화 주파수(μ)를 파라미터로 하여 무차원화 부하제어변수(λ)의 변화에 대한 출력전압 특성을 보여주고 있다. 그림 12에서 보듯이 특정한 무차원화 커패시터의 비에

대한 부하제어변수(λ)를 0.5에서 5.0으로 증가하였을 경우, 출력전압특성 및 무차원화 주파수의 제어 변동범위가 그림 12 (e)인 무차원화 커패시터의 비가 2.0에서 가장 작지만, 출력전압특성이 커진다. 따라서 본 논문에서는 그림 12 (b)인 무차원화 커패시터의 비가 0.14이고, 무차원화 주파수의 변화가 1.08에서 1.62로 가변되는 특성을 선정하였다.

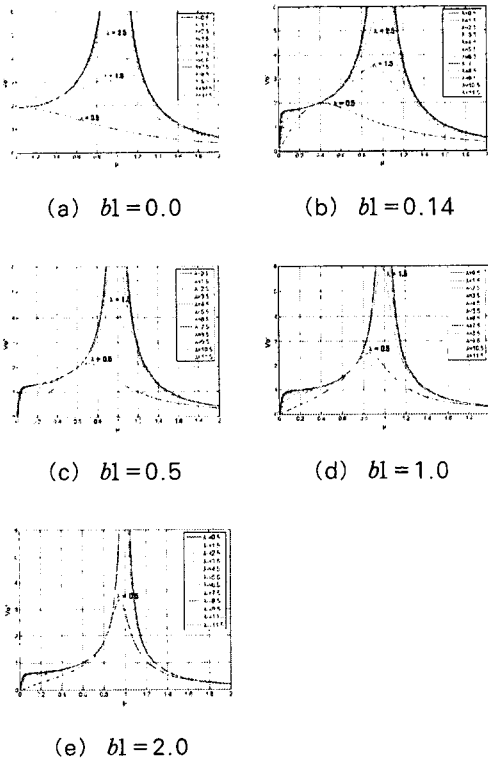


그림 12. 무차원화 커패시터 비 vs. 출력전압특성(λ 변화)
Fig. 12. Characteristic of $b1$ vs. V_o^* (λ 변화)

2.5 회로 설계

기본 설계 사양으로 입력전압 $E_d[V]$, 출력전력 $P[W]$ 가 주어졌을 경우, 회로해석을 통해서 얻은 특성 평가치와 이론치를 근거로 하여 최적인 회로정수를 구하기 위한 회로 설계 과정의 일에는 다음과 같고, 표 3은 설계된 회로정수를 보여주고 있다.

Step 1 $E_d=300[V_{dc}], V=300[V], P=21[kW]$

Step 2 $\lambda=0.5, \mu=1.08, b1=0.14$

Step 3 $P^*=1.617, V^*=1.0$

Step 4 $Z_s=6.93$

$$Z_s = \frac{E_s^2 \cdot P^*(z)}{P} = \frac{300^2 \cdot 1.617}{21000} = 6.93$$

Step 5 $L_s=74[\mu H], C_s=1.54[\mu F], Cr2=0.22[\mu F]$

먼저, $L_s = 74[\mu H]$ 선정,

$$C_s = \frac{L_s}{Z_s^2} = \frac{74 \times 10^{-6}}{6.93^2} = 1.54[\mu F]$$

$$Cr2 = b1 \cdot C_s = 0.14 \cdot (1.54 \times 10^{-6}) = 0.2156[\mu F] \approx 0.22[\mu F]$$

Step 6 $fr=14.9[kHz]$

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{74 \times 10^{-6} \times 1.54 \times 10^{-6}}} = 14.909[kHz] \approx 14.9[kHz]$$

Step 7 $fsw=16.09[kHz]$

$$f_{sw} = \mu \cdot f_r = 1.08 \cdot (14.9 \times 10^3) = 16.092[kHz] \approx 16.09[kHz]$$

Step 8 $R=3.5$

$$R = \lambda \cdot Z_s = 0.5 \times 6.93 = 3.465 \approx 3.5$$

Step 9 $V=300[V_{dc}]$

$$V = V^*(z) \cdot E_s = 1.0 \times 300 = 300[V_{dc}]$$

2.6 실험

그림 13은 비접촉 전원장치 시제품의 블록도를 보여주고 있다. 그림 13에서 보듯이 1차측 시스템, 2차측 시스템, Inductive Coupler 장치로 구성하였으며, 부하 변동에 따른 2차측 시스템의 출력전압 변동은 2차측 시스템의 광모뎀에 의해 1차측 시스템으로 전송하여 1차측 시스템에서 주파수(PFM) 제어에 의해 트랙에 공진전류의 크기를 조정하여 2차측 시스템의 출력전압 제어를 보여 주고 있다.

표 4는 실험에 사용 되어진 비접촉 전원장치 시제품의 실험사양을 나타내고 있다.

표 3. 설계 회로정수

Table 3. Design of circuit parameter

User Specification	
Ed	300 [V _{dc}]
P	21 [kW]
Parameter	
λ	0.5
μ	1.08
$b1$	0.14
Value Of Theoretical Characteristic	
P*	1.617
V*	1.0
Circuit Parameter	
L _S	74 [μ H]
C _S	1.54 [μ F]
Cr2	0.22 [μ F]
R _{eq}	3.5
f _r	14.9 [kHz]
f _{sw}	16.09 [kHz]
Z _s	6.93
V _o	300 [V _{dc}]

파형을 나타내고 있다. 그림 15에서 보듯이 경부하 시 스위칭 주파수(f_{sw})가 24.9[kHz]에서 동작되며, 공진압양단 전압과 공진전류를 살펴보면, 그림 6의 유도성 패턴으로 동작됨을 알 수 있다.

표 4. 시제품의 실험 사양

Table 4. Experimental parameter of Prototype contactless power supply system

Item	Symbol	Value/Plant
트랙 공진리액터	Lr	73.4[μ H]
직렬 공진커패시터	Cr1	1.54[μ F]
병렬 공진커패시터	Cr2	0.22[μ F]
Power Switiches (IGBT)	S1~S4	SKM400GB128D (400[A])
정류다이오드	D1~D4	SKKD105F (100[A],trr:0.5[μ s])
공진주파수	f _r	15[kHz]
트랙 길이	Track[m]	23[m]
부하 용량	Power	21[kW]
출력 전압	V _{co}	300[V _{dc}]

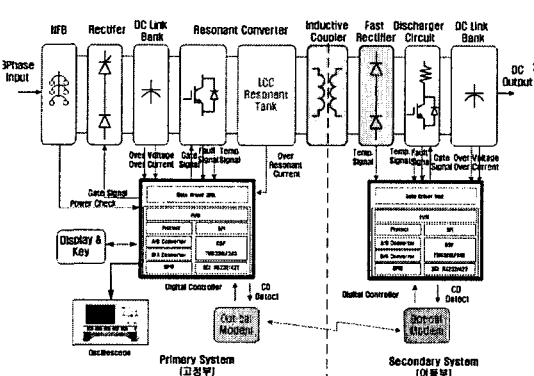


그림 13. 비접촉 전원장치 시제품의 실험 블록선도

Fig. 13. Experimental Block diagram of Proto type Contactless Power Supply System

그림 14는 설계에 의해 제작된 20[kW]용량을 가지는 비접촉 전원장치의 시제품을 보여주고 있다.

그림 15는 경부하인 서보모터를 구동하기 전인 제어기 ON시 실측한 출력전압(V_{co}), 공진압양단 전압(V_{AB}), 트랙에 흐르는 공진 리액터의 공진전류(i_{Lr})의

그림 16은 20[kW]의 부하로 기동하는 모터를 실측한 출력전압(V_{co}), 공진압양단 전압(V_{AB}), 트랙에 흐르는 공진 전류(i_{Lr})의 파형을 보여주고 있다. 그림 16에서 보듯이 20[kW] 부하 시 스위칭 주파수(f_{sw})가 18.7[kHz]에서 동작되며, 그림 15와 그림 16에서 보듯이 부하가 경부하에서 20[kW]의 부하로 구동시 주파수 제어에 의한 공진전류의 증가를 통해 2차측 시스템의 출력전압이 변동됨을 알 수 있다. 또한 부하 변동시 스위칭 주파수의 범위는 18.7[kHz]에서 24.9[kHz]까지 가변됨을 알 수 있다.

그림 17은 부하출력 변화에 대한 효율특성곡선을 나타내고 있다. 그림17에서 보듯이 부하출력이 1[kW]에서는 효율이 낮지만, 선형 구동 시스템의 동작범위에서는 양호한 효율 특성임을 알 수 있다.

그림 18은 기동하는 모터에 실측한 출력전압(V_{co}), 출력기준전압(V_{ref}), 공진압양단 전압(V_{AB}), 트랙에 흐르는 공진 리액터의 공진전류(i_{Lr}) 파형을 보여주고 있다. 그림 18에서 보듯이 20[kW] 부하시 스위칭 주파수(f_{sw})가 18.7[kHz]에서 동작되며, 출력기준전압에 의한 공진압양단 전압과 공진전류를

살펴보면, 스위칭 주파수의 변화 즉, PFM 제어에 의해 1차측 시스템의 공진전류를 제어하여 선형 구간에서 이동하는 2차측 시스템의 출력전압이 잘 제어됨을 알 수 있다.

그림 19는 실험을 통해 실측한 V_{ref} , V_{co} , i_{Lr} 의 기동과도상태의 파형을 보여주고 있다. 그림 19에서 V_{ref} 는 2차측 시스템에 출력전압의 기준 전압을 나타내고, V_{co} 는 2차측 시스템의 실제 출력전압을 나타내고, i_{Lr} 는 공진 회로의 L_r 에 흐르는 공진전류를 나타내고 있다. 그림 19에서 보듯이, V_{ref} 에 대해서 V_{co} 가 잘 추종함을 알 수 있으며, 이것은 스위칭 주파수의 가변에 의해 발생되어진 공진 전류(i_{Lr})의 가감에 의한 출력전압(V_{co})을 제어하게 되며, 1차측 시스템이 ON하고 나서 2차측 시스템이 동작되어지는 시간이 약 7초 정도의 시간이 발생하는 것은 비접촉 전원장치의 특성상 선형 구간에서 이동부인 2차측 시스템의 소프트 차징을 위해 일정한 시간을 두고 있다.

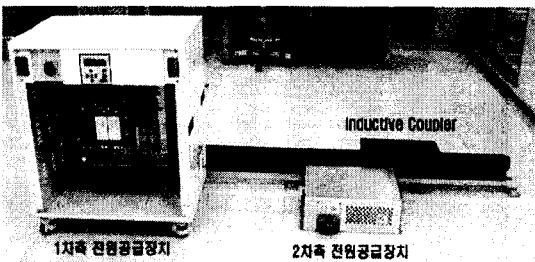


그림 14. 비접촉 전원장치의 시제품
Fig. 14. Experimental Equipment of Proto type contactless power supply system

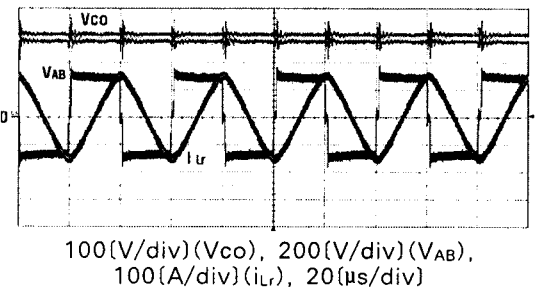


그림 15. V_{co} , V_{AB} , i_{Lr} 의 정상상태 실측파형(경부하)
Fig. 15. Experimental Waveforms of V_{co} , V_{AB} , i_{Lr} for Steady State(light load)

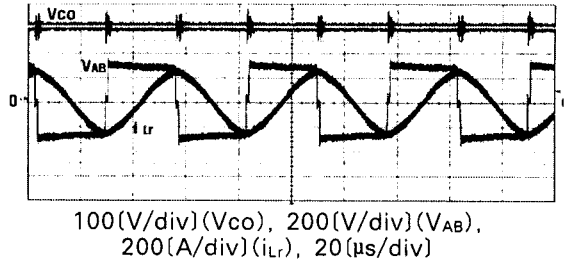


그림 16. V_{co} , V_{AB} , i_{Lr} 의 정상상태 실측파형(full부하)
Fig. 16. Experimental Waveforms of V_{co} , V_{AB} , i_{Lr} for Steady State(full load)

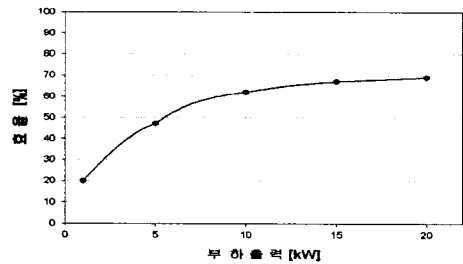


그림 17. 효율 특성
Fig. 17. Efficiency characteristics

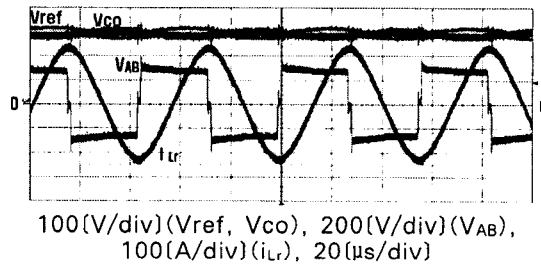


그림 18. V_{ref} , V_{co} , V_{AB} , i_{Lr} 의 정상상태 실측파형
Fig. 18. Experimental Waveforms of V_{ref} , V_{co} , V_{AB} , i_{Lr} for Steady State(full load)

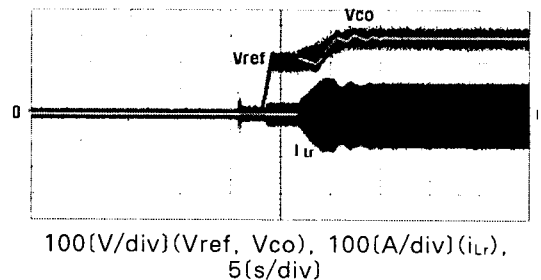


그림 19. V_{ref} , V_{co} , i_{Lr} 의 과도상태 실측파형
Fig. 19. Transient waveforms of V_{ref} , V_{co} , i_{Lr}

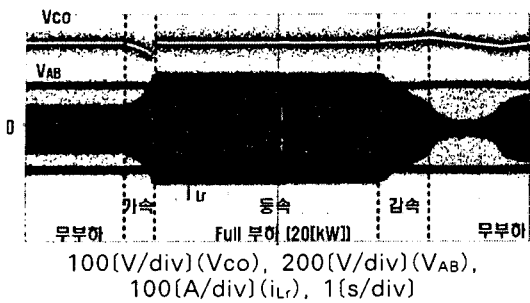


그림 20. V_{co} , V_{AB} , i_{Lr} 의 실측파형
Fig. 20. Waveforms of V_{co} , V_{AB} , i_{Lr}

그림 20은 선형 구동시스템을 기동하였을 경우, 2차측 시스템의 출력전압(V_{co})과 트랙에 흐르는 공진 리액터의 공진전류(i_{Lr}), 공진압양단 전압(V_{AB})의 실험파형을 보여주고 있다. 그림 20에서 보듯이 2차측 시스템의 부하 변동이 되는 무부하에서 20[kW]로, 20[kW]에서 무부하로 변동되는 경우에도 1차측 시스템의 공진전류에 의한 2차측 시스템의 출력전압이 잘 제어됨을 알 수 있다. 즉 선형구간에서 이동부인 2차측 시스템이 가, 감속 및 등속으로 이동되어 질 때 출력전압이 잘 되어짐을 보여주고 있다. 이 특성은 선형 구동시스템이 기동 시와 정지 시 그림 15, 그림 16으로 제어됨을 보여 주고 있다.

3. 결 론

본 논문은 반도체 및 LCD 생산 공정 장비에 고정정을 위한 전원장치로 전기적 접촉이 없이 자기장을 이용한 에너지를 전달하는 비접촉 전원장치에 관한 연구를 수행하였다.

연구결과로 비접촉 전원장치에 LCC형 고주파 공진 DC/DC 컨버터를 적용한 무차원화 된 회로해석, 특성평가 및 설계를 행하였고, 설계의 일례를 바탕으로 20[kW]용량의 시제품을 제작하여 실험을 행하였다.

또한 장거리 선형 구동 시스템에 적용하여 선형구간에서 이동하는 2차측 시스템의 부하 변동에 대한 출력전압 제어 및 기동 특성이 잘 이루어짐을 알 수 있었으며, 향후, 반도체 및 LCD 이송 장비의 전원장치에 적용 가능하리라 생각된다.

References

- (1) 강성룡, "2005 부품·소재로드맵 총론", 산업기술재단, pp.165-170., 2005. 12.
- (2) 강성룡, "2005 부품·소재로드맵 반도체·디스플레이 장비부품", 산업기술재단, pp.474-579, 2005. 12.
- (3) Hideaki Abe, Hiroshi Sakamoto and Koosuke Harada, "A Non-Contact Charger using A Resonant Converter with Parallel Capacitor of the secondary coil", APEC'98, pp.136-141, 1998.
- (4) J. T. Boys, G. A. Covic and A. W. Green, "Stability and Control of inductively coupled power transfer systems", IEE Proc-Electr. Power Appl., Vol 148, No. 1, January, 2000.
- (5) Hideki Ayano, Kouki Yamamoto, Noriaki Hino, and Ikuo Yamato, "Highly Efficient Contactless Electrical Energy Transmission System", IEEE, pp.1364-1369, 2002.
- (6) 황계호, 강도현, 김중우의 5명, "TFLM에 적용한 직·병렬 공진형 DC/DC 컨버터의 출력전압 제어에 관한 연구", 반도체 및 디스플레이 장비학회 논문지, Vol.4(1), pp.9-15, 2005.
- (7) 공영수, 김은수, 양승철, 김중우, 신병철, "직·병렬 공진형 컨버터를 이용한 비접촉전원", 전력전자학회 논문지, 제9권 제5호, pp.405-412, 2004, 10.
- (8) 황계호, 김동희의 4명, "공진 전압 합성형 DC/DC 컨버터의 특성해석", 대한전기학회 논문지, Vol.49B(1), pp.40-47, 2000.

◇ 저자소개 ◇

황계호 (黃啓鎬)

1972년 4월 7일생. 1997년 삼척대 공대 제어계측공학과 졸업. 1999년 영남대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2007년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 2003년 3월~2003년 8월 김천대학 겸임교수. 2003년 9월~현재 (주)신성이엔지 기술연구소 선임연구원.

김동희 (金東熙)

1950년 11월 20일생. 1973년 영남대 공대 전기공학과 졸업. 1975년 영남대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 Kobe대학 졸업(박사). 1987년~1989년 한국전기연구소 전력전자 연구부장. 1999년 5월~2000년 4월 대한전기학회 전력전자연구회 간사장. 2000년 9월~2001년 2월 국립 Kyushu대 교환교수. 한국조명·전기설비학회 학술위원. 현재 영남대 공대 전자·정보공학부 교수.