

# 선형전동기에 적용한 비접촉 전원장치에 관한 연구

전진용, 오준태, 김규식  
서울시립대학교

## A Study on the Non Contact Power Supply Applied to Linear Motor

Jin-Yong Jeon, Joon-Tae Oh, Gyu-Sik Kim  
Dept. of Electrical and Computer Engineering, University of Seoul.

### ABSTRACT

반도체 칩 마운터는 PCB기판위에 칩을 마운팅 하는 장비로 짧은 시간내에 많은 양의 칩을 정확하게 마운팅 하기 위해 매우 빠른 가감속 운전과 정밀한 작업을 수행할 수 있는 선형전동기를 사용해 오고 있다.

고가임에도 빠른 응답특성, 높은 정밀도, 유지보수의 최소화 등 선형전동기가 가지고 있는 여러 가지 장점으로 인해 반도체를 포함한 LCD 및 기타 일반 산업에 까지 점진적으로 수요가 증가하고 있지만, 이동자에 전기자 권선을 가지고 있어 장거리 이송용으로 적합한 선형전동기의 경우 전원 케이블을 반복적으로 끌고 다녀야 하는 단점이 있어, 이런 문제점을 극복하기 위한 비접촉 방식의 전원 공급에 대해 많은 연구가 진행되고 있는 실정이다.<sup>[1-3]</sup> 따라서 본 연구에서는 직병렬 공진 원리를 이용하여 움직이는 이동자의 전기자 권선에 비접촉으로 전원을 공급하는 전원 장치를 제안하며, LCD 자동 반송 장비인 스토커에 적용하여 특성을 분석하였다.

### 1. 서론

자동차와 더불어 반도체, LCD로 대표되는 한국 수출 산업은 후발업체로서의 열악한 환경을 딛고 과감하고 지속적인 연구개발과 투자로 세계의 우수한 업체들과 경쟁 할 수 있는 국가 기간 산업이 되었다. 특히 반도체 메모리, LCD분야는 일본이 오래 전부터 기술과 시장에서 독주해 오던 분야임에도 불구하고, 비교적 짧은 시간에 품질과 생산량에서 세계 최고로 올라섰다.

하지만, 선 투자를 통한 이익 극대화와 단순한 원가절감이 새로운 산업 패러다임의 대두와 급변하는 세계 시장 환경에서 더 이상 경쟁력을 가질 수 없게 되었고 국내의 패널업체도 장비업체와의 지속적인 기술개발 및 원천 기술 확보에 주력해야 하는 시점에 이르게 되었다.

반도체, LCD분야에서 구동원으로 선형전동기를 적용하면 동력 전달 장치가 생략되어 고속고가속의 직선 운동이 가능하여 생산성을 높일 수 있으며 소음, 진동, 분진, 에너지 손실의 발생이 현저하게 감소된다. 그리고 동력 전달 장치에서 나타나는 변형이나 백래쉬가 없어지기 때문에 고속 운전 시에도 고정도의 효과를 얻을 수 있다. 또한 이송 물체를 선형전동기로 직접 구동시키기 때문에 동력 전달 장치의 유지 보수가 필요 없어 수명이 반영구적이다.

이와 같이 선형전동기가 가진 많은 장점들 때문에 반도체, LCD분야에서도 공정 장비 및 소형 이송 장비에 선형 전동기가 일부 적용되어 사용되고 있다. 그러나 이동자에 전기자 권선을 가지고 있어 장거리 이송용으로 적합하도록 고안된 선형전동기의 경우 전원 케이블을 움직이는 가이드 내부에 설치하고 반복적으로 끌고 다님으로 인해 또 다른 문제점을 발생시켰다.

따라서, 본 연구에서는 장거리 전송에 적합하며 분진 발생을 원천적으로 제거하여 비접촉으로 전원을 공급하는 비접촉 전원 장치를 제안하고 제안된 장치의 특성을 시뮬레이션을 통하여 분석하였다. 또한 직렬공진과 병렬공진의 장점을 모두 가지고 있는 직병렬 공진의 특성을 분석하기 위해 실제 LCD스토커의 주행축으로 사용되고 있는 횡자속 선형전동기의 이동자인 전기자 권선에 비접촉으로 전원을 공급하고 무부하에서 풀부하(35[kW])까지 전압이 정상적으로 제어되는지 확인하였다.

### 2. 비접촉 전원장치

#### 2.1 비접촉 전원장치 기본 구조

그림1은 고정부의 전원을 이동하는 물체의 전원으로 전달하기 위해 접촉식으로 전원을 공급하는 실례를 나타낸 것으로, 1차측과 2차측이 브러쉬(Brush)의 접촉에 의해 이루어지기 때문에 마찰에 의한 분진발생과 주기적인 유지보수를 필요로 하는 단점을 가지고 있다.

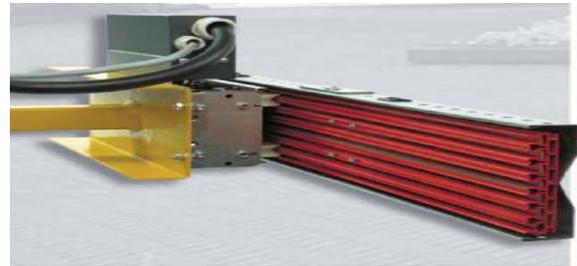


그림 1 이동부에 전원공급을 위한 접촉식 전원공급 장치  
Fig.1 Contact type power supply

제안한 비접촉 전원장치는 크게 1차측 전원장치, 2차측 전원장치, 1차측의 전원을 2차측으로 유도하는 비접촉 변압기로 구성이 된다. 1차측 전원장치는 고정부로서 공장의 유틸리티(Utility)로부터 공급되는 전원 소스가 연결되는 부분이고, 비접촉 변압기와 2차측은 움직이는 이동부에 해당된다.

그림 2는 비접촉 전원장치의 기능별 구성도를 나타낸다. 1차측 전원장치는 3상 교류전원이 입력되면 정류부와 평활부를 거쳐 단상직류로 변환하는 컨버터(Converter)부, 변환된 직류 전원을 직병렬 공진을 통해 고주파수(13[KHz]~77[KHz])로 변환하는 인버터(Inverter)부, 캐패시터와 비접촉 변압기로 구성된 직렬 LC공진회로와 이를 다시 캐패시터로 구성된 2차측 병렬 LC공진회로로 구성되며, 2차측 전원장치는 고주파수의 공진전원을 단상직류로 변환하는 정류부와 평활부, 이동체의 감속 시 회생 에너지에 의한 전압상승을 막아주는 방전부와 부하부로 구성된다.

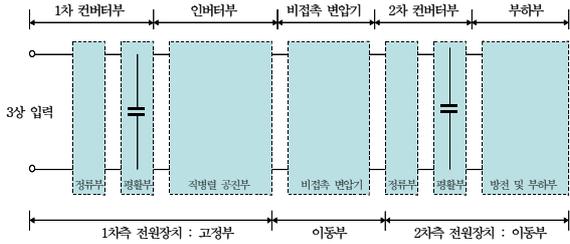


그림 2 비접촉 전원 장치 기능별 구성도  
Fig.1 Block diagram of non-contact power supply

## 2.2 직병렬 공진 컨버터

물리적 접촉 없이 에너지를 전달하는 비접촉 전원장치는 구조적으로 큰 공극을 가지고, 이 공극으로 인하여 변압기의 자화 인덕턴스(Magnetizing Inductance)는 매우 작아지고 누설 인덕턴스(Leakage Inductance)는 상대적으로 매우 커져 변압기의 작은 결합계수로 인한 에너지 전달 효율이 낮아진다.

낮은 에너지 전달의 단점을 극복하고 비접촉 변압기의 누설 인덕턴스를 회로의 공진 소자로 이용하고 고주파수로 동작시켜 최종 부하단에서 필요로 하는 에너지를 효율적으로 공급하기 위하여 LC공진을 이용한 풀브리지(Full Bridge)회로를 제안한다. 그림3은 직병렬 공진 컨버터를 그림 4는 등가회로를 나타낸다.

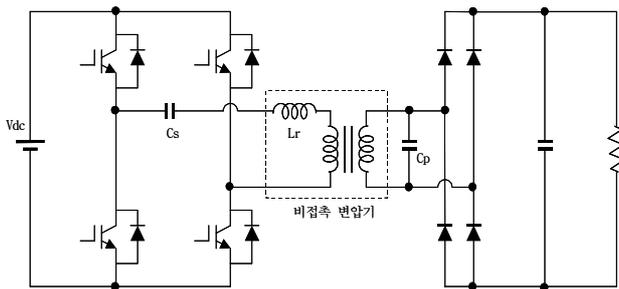


그림 3 직병렬 공진 컨버터  
Fig.3 Series-parallel resonant converter

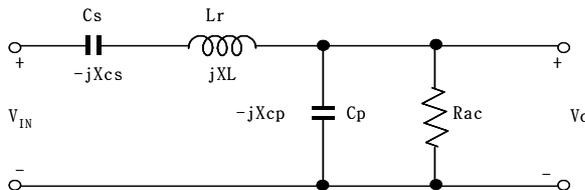


그림 4 직병렬 공진 컨버터 등가회로  
Fig.4 Equivalent circuit of series-parallel resonant converter

그림4의 등가회로로부터 전압이득식은 식(1)과 같다.

$$\frac{V_o}{V_{IN}} = \frac{1}{1 + \frac{X_{cs}}{X_{cp}} - \frac{X_L}{X_{cp}} + j\left[\frac{X_L}{R_{ac}} - \frac{X_{cs}}{R_{ac}}\right]} \quad (1)$$

여기서  $V_o = \frac{\pi E_O}{2\sqrt{2}}$  이고,  $V_{IN} = \frac{2\sqrt{2} E_d}{\pi}$  이다.

dc전압이득은 최종적으로 다음 식(2)로 나타낸다.

$$\frac{E_O}{E_d} = \frac{1}{\frac{\pi^2}{8} \left[1 + \frac{C_p}{C_s} - w^w L C_p\right] + jQ_s \left[\frac{w}{w_s} - \frac{w_s}{w}\right]} \quad (2)$$

이때,  $Q_s = \frac{X_L}{R_L}$ ,  $w_s = \frac{1}{\sqrt{L_r C_s}}$  로 정의한다.

$V_{IN}$ 은 인버터의 공진 회로에 적용되는 구형파 전압의 기본 요소이며, 하프 브리지(Half Bridge) 컨버터용으로 구형파 전압은  $E_{IN}/2$  의 크기를 갖는다. 왜냐하면 공진회로의 입력은 구형파 전압이고 출력 또한 구형파 전압이기 때문이다. 이때,  $E_{IN}$ 은 하프브리지 양단에 걸리는 전압이고  $E_O$ 는 출력전압이다.<sup>[4]</sup>

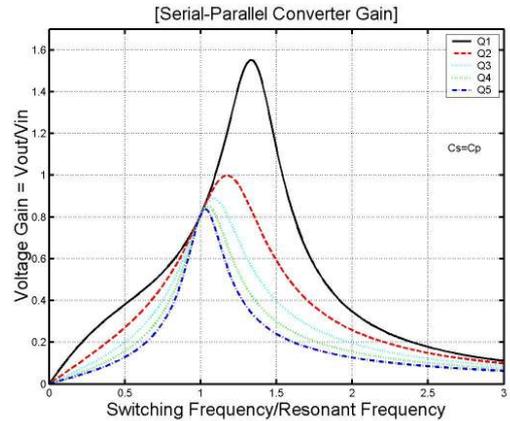


그림 5 직병렬 공진 컨버터의 전압이득 곡선  
Fig. 5 Voltage gain curve of series-parallel resonant converter

수식 (2)로부터 직병렬공진 컨버터의 부하이득곡선을 그림 5에 나타낸다. 가로축은 공진주파수에 대한 스위칭 주파수의 관계를 나타내며, 세로축은 입력전압에 대한 출력전압의 비, 즉 전압이득을 나타낸다. 직렬공진 컨버터와 병렬공진 컨버터가 가지고 있는 문제점을 개선한 직병렬 공진 컨버터는 경부하에서는 직렬공진 컨버터와 비슷한 동작을 하고 중부하에서는 병렬공진 컨버터에 가까운 동작을 한다. 따라서 제어를 위해 주파수 변동폭이 다소 넓으나 직병렬 공진 컨버터를 적절히 선정함으로써 우수한 제어특성과 낮은 순환전류 손실을 얻을 수 있다.

## 3. 실험 결과

비접촉 전원공급장치는 횡자속 선형전동기의 전기자 권선

이 감겨져 있는 이동자 즉 2차측 부하에서 필요로 하는 전원을 2차측 전원공급장치의 무선통신 모듈을 통하여 1차측으로 전송하게 되고, 1차측 전원공급장치는 공진주파수 대비 스위칭 주파수를 제어하여 비접촉 변압기의 공진전류의 크기를 조정하여 2차측 전원공급 장치의 최종 출력전압을 제어한다.

그림 6은 횡자속 선형전동기의 이동자가 동작하기 전 무부하 상태, 즉 전원만 공급된 상태에서 인버터암 양단전압( $V_{ab}$ )과 비접촉 변압기의 1차측 인덕턴스에 흐르는 공진전류( $I_{Lr}$ )의 파형을 나타내고 있다. 무부하 상태에서 출력전압 제어를 위해 스위칭 주파수는 77[KHz]이고, 공진 주파수에서 많이 벗어나므로 공진전류는 거의 흐르지 않음을 알 수 있다.

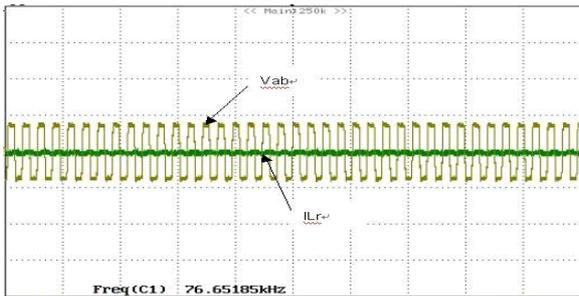


그림 6 무부하시의 비접촉 전원장치 측정 파형  
 $V_{ab}$ : [400VDC/Div],  $I_{Lr}$ : [200A/Div]  
 Fig.6 Experimental waveform in no load  
 $V_{ab}$ : [400VDC/Div],  $I_{Lr}$ : [200A/Div]

그림 7은 35[kW] 풀부하에서 측정된 인버터암 양단전압 ( $V_{ab}$ ), 비접촉 변압기의 1차측 인덕턴스에 흐르는 공진전류 ( $I_{Lr}$ )의 파형을 나타내고 있다. 스위칭 주파수는 13[KHz]이고 최대 공진전류는 140[A]이다. 무부하 상태에서 35[KW] 부하로 가변하는 동안 스위칭 주파수는 출력전압 제어를 위해서 77[KHz]에서 13[KHz]로 감소하였다.

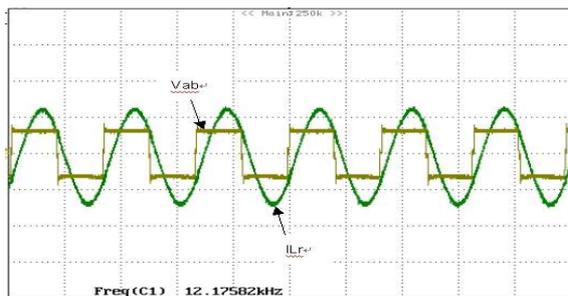


그림 7 35[kW]시의 비접촉 전원장치 측정 파형  
 $V_{ab}$ : [400VDC/Div],  $I_{Lr}$ : [100A/Div]  
 Fig.4 Experimental waveform in 35[kW] load  
 $V_{ab}$ : [400VDC/Div],  $I_{Lr}$ : [100A/Div]

그림 8은 스토커의 크레인 이 속도 1.5[m/s]로 왕복 주행 시에 비접촉 전원장치의 2차측 출력 전압( $V_{out}$ )과 전류( $I_{out}$ )를 나타낸다. 'A'구간은 크레인 이 주행, 승강, 회전을 동시에 수행하면서 최대 전류 120[A]를 소비하는 구간이며, 'B'구간은 횡자속 선형전동기가 정속구간을 운행하는 동안 20[A]의 전류를 소비하는 구간이며, 'C'구간은 목표 지점에 도착한 후 크레인의 포크를 뺐는 동안 10[A]의 전류를 소비하는 구간이다. 이때, 왕복 주행을 수행하는 전 구간에서 출력전압은 항상

300[VDC]를 유지한다. 결국, 비접촉 전원장치는 왕복 주행 시 출력 측 전압, 전류를 정상적으로 제어하고 최고 출력 용량은 35[KW]가 됨을 알 수 있다.

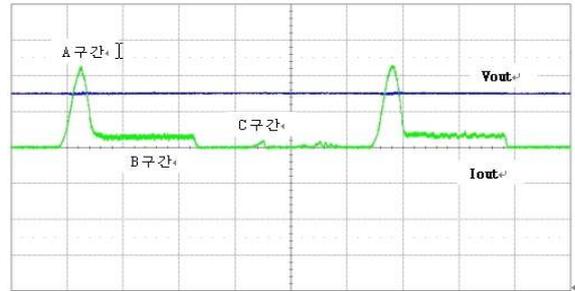


그림 8 스토커 크레인의 왕복주행에 따른 출력전압, 전류  
 $V_{out}$ : [200VDC/ Div],  $I_{out}$ : [50A/ Div]  
 Fig.5 Voltage output, Current output by round trip of crane  
 $V_{out}$ : [200VDC/ Div],  $I_{out}$ : [50A/ Div]

#### 4. 결론

고가라는 단점에도 불구하고 빠른 응답특성, 높은 정밀도, 유지보수의 최소화라는 장점으로 인해 반도체를 포함한 LCD 및 기타 일반 산업에 까지 선형전동기의 수요는 점진적으로 증가하고 있는 추세이다. 장거리에 적합하도록 고안된 선형전동기의 경우 이동자에 전기자 권선을 가지고 있어 전원 공급 케이블을 이동식 케이블 덕트 속에서 계속 끌고 다녀야 했고 이로 인한 케이블 수명 단축 및 분진 발생은 양질의 웨이퍼, LCD생산 수율에 막대한 손실을 유발했다.

본 연구에서는 이런 문제점을 극복하고자 비접촉으로 전원을 공급하는 전원공급 장치를 제안했다. 직렬공진과 병렬공진의 장점을 모두 접목한 직병렬 공진을 이용한 비접촉 전원 공급 장치는 무부하에서 풀부하영역까지 주파수 제어를 통하여 안정된 출력 전압을 공급함을 검증하였다.

한편, 이동자에 전기자 권선을 가지는 선형전동기 뿐만 아니라, 이동자에 전원공급을 필요로 하는 모든 장치는 기본적으로 이동식 케이블 덕트를 설치해야 하므로, 본 연구에서 제안한 비접촉 전원장치의 응용 분야는 계속해서 증가할 것으로 판단된다.

#### 참고 문헌

- [1] E. Abel and S. M. Third, "Contactless Power Transfer—An exercise in topology", IEEE Transactions of Magnetics, Vol.Mag-20, No.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, No.3, 2003.
- [3] Bimal. K. Bose., "Recent Advances in Power Electronics", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol.7, No.1, pp.1-11, 1992.
- [4] ROBERT L. STEIGERWALD, senior member, IEEE " A Comparison of Half-Bridge Resonant Converter Topologies"IEEE Transactions on power electronics, vol. 3, NO. 2, April 1988. pp.174-182.