

비접촉 전원장치에서 스위칭 손실 저감을 위한 강압형 트랜스포머 설계

류명호, 차현녕, 백주원

한국전기연구원

Step down Transformer Design for reducing Switching Loss in Non contact Power Supply

M.H. Ryu, H.N. Cha, J.W. Baek

Korea Electrotechnology Research Institute

Abstract - 본 논문에서는 비접촉 전원장치와 같이 누설 인덕턴스가 큰 공진형 컨버터에서 스위치단과 공진 탱크 사이에 강압형 매칭 트랜스포머를 삽입하여 스위치의 공진 전류를 줄이는 방법을 제안하였다. 누설인덕턴스가 큰 공진형 컨버터에 강압형 매칭 트랜스포머를 추가함으로써, 일차측의 입력 임피던스를 증가시켜 동일 전압에 대하여 전류의 크기를 작게 하고, 또한 전압과 전류의 위상을 거의 일치시켜 무효 전력 성분을 감소시킬 수 있다. 본 논문에서는 비접촉 트랜스포머의 파라메타 측정을 통하여 비접촉 트랜스포머의 등가화 회로를 구현하였고, 일반 비접촉 트랜스포머와 강압형 매칭 트랜스포머를 추가한 트랜스포머의 전압 이득과 입력 임피던스 특성을 해석하였다. 강압형 매칭 트랜스포머의 특성을 검증하기 위하여 30kW급 비접촉 전원장치를 제작하여 실험하였다.

1. 서 론

현재 반도체 이송장비와 같이 청정 환경을 요구하는 산업 분야에서는 전원 공급을 일반 전원선에 의한 공급을 대신하여, 비접촉 전원장치에 의한 전원공급이 증가하고 있는 추세이다. 일반 전원선에 의한 전력 공급은 긴 전원선이 이송장비가 이동할 때, 마찰에 의하여 먼지(particle)가 발생하여 제품에 손상을 줄 수 있으나, 비접촉 전원장치는 긴 트랙에 일차 권선을 위치시키고, 이차측 코어에 이차 권선을 감아 에너지를 이차측으로 전달시키므로, 마찰에 의한 먼지를 없앨 수 있는 장점이 있다. 그림 1은 일차측 트랙에 이차측 코어를 위치시킨 비접촉 트랜스포머를 나타내고 있다.

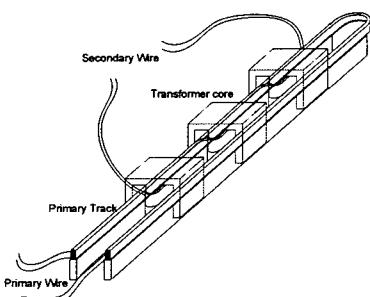


그림 1. 비접촉 트랜스포머

Fig. 1 Non-contact Transformer

비접촉 전원장치는 일차측과 이차측이 항상 분리되어 있고, 보통 트랙의 길이가 10m 이상으로 길어, 트랜스포머의 누설인덕턴스가 자화인덕턴스에 비하여 상대적으로

로 크게 나타나고 결합계수 k 가 아주 작다. 이는 일차측의 에너지를 이차측으로 전달하는 데 많은 어려움이 있으므로, 보통 공진형 컨버터를 적용하여 에너지의 전달을 용이하게 하고 있다.

비접촉 공진형 전원장치는 주로 직렬 공진형 또는 직/병렬 공진형 컨버터를 적용하여 영전압 스위칭(ZVS : zero voltage switching)이 가능하므로 스위치의 스위칭 손실은 감소하지만, 일차측의 공진 전류가 크게 증가하여 일차측 권선 손실을 증가시키고, 스위치의 도전 손실을 증가시키는 원인이 된다. 또한, 전압과 전류의 위상 차이가 크게 발생하므로 무효 전력 성분이 커 시스템 전체 효율이 저하되는 단점이 있다. 아래 그림 2는 기본적인 비접촉 공진형 컨버터를 나타내고 있다.

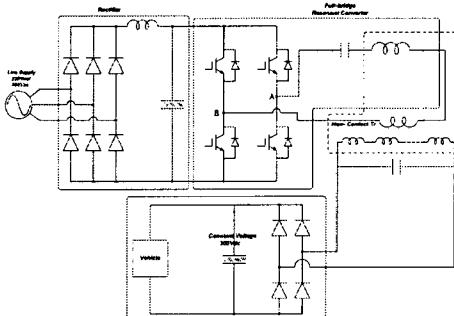


그림 2. 비접촉 공진형 컨버터

Fig. 2 Non-contact Resonant Converter

일차측 공진전류와 무효 전력 성분을 감소시키기 위하여, 직렬 공진 주파수와 병렬 공진 주파수를 동일하도록 설계하여, 동작 주파수를 공진 주파수에 위치시키는 방법이 주로 사용되고 있다. 이는 손실을 무시할 경우, 동일 주파수에서 부하에 관계없이 동일한 전압 이득을 얻을 수 있고, 공진에 의하여 자화 인덕턴스에 흐르는 자화 전류가 일차측의 공진전류에 영향을 주지 않으므로 공진전류의 크기가 크게 줄어드는 장점이 있다. 또한, 공진 주파수에서 동작시키므로, 전압과 전류의 위상이 일치하여, 무효 전력 성분 또한 작아지게 된다.

2. 본 론

2.1 강압형 매칭 트랜스포머

본 논문에서는 스위치의 도전손실과 무효 전력 성분을 줄이기 위하여, 스위치단과 공진 탱크 사이에 강압형 매칭 트랜스포머를 추가하였다. 아래 그림 3은 강압형 매칭 트랜스포머를 추가한 비접촉 공진형 컨버터를 나타내고 있다.

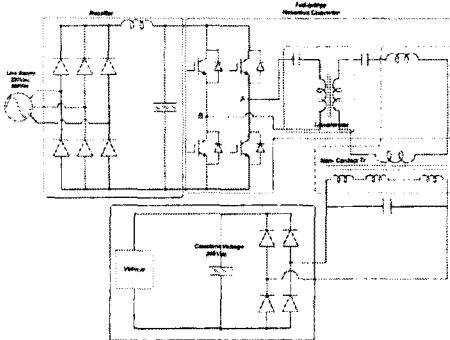


그림 3. 강압형 매칭 트랜스포머
Fig. 3 Step-down Matching Transformer

강압형 매칭 트랜스포머의 특성을 해석하기 위하여 먼저, 비접촉 트랜스포머의 등가회로를 아래와 같이 나타낼 수 있다. 아래 그림 4는 비접촉 트랜스포머의 등가회로를 나타내고 있다.

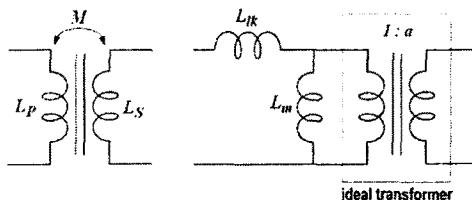


그림 4. 트랜스포머 등가회로
Fig. 4 Equivalent Circuit of the transformer

여기에서, 상호인덕턴스(M , Mutual Inductance), 트랜스포머 결합계수(k , Coupling Coefficient), 누설 인덕턴스(L_k , Leakage Inductance), 자화 인덕턴스(L_m , Magnetizing Inductance), 턴비(a , Turn Ratio)는 아래 수식과 같이 나타낼 수 있다.

$$M = \frac{L_{par} - L_{par}}{4} \quad (1)$$

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_p L_s}} \quad (2)$$

$$L_k = L_p (1 - k^2) \quad (3)$$

$$L_m = k^2 L_p \quad (4)$$

$$a = \frac{L_s}{M} \quad (5)$$

기존의 트랜스포머에 강압형 매칭 트랜스포머를 추가하였을 경우, 아래 그림 5와 같이 직렬 공진 등가회로를 표현할 수 있다. 여기에서, C_r 은 직렬 공진 커패시터, R_{ac} 은 등가화된 부하 저항이다.

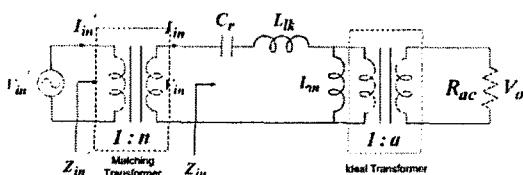


그림 5. 매칭 트랜스포머를 추가한 등가회로
Fig. 5 Equivalent Circuit with Matching Transformer

기존 트랜스포머에 매칭 트랜스포머를 추가하였을 경우 각각의 전압이득과 입력임피던스는 아래 수식과 같이 나타낼 수 있다.

$$M = \frac{V_o}{V_m}, \text{ without matching Transformer} \quad (6)$$

$$M' = \frac{V_o}{V_m'} = nM, \text{ with matching Transformer} \quad (7)$$

$$Z_m = \frac{V_m}{I_m}, \text{ without matching Transformer} \quad (8)$$

$$Z_m' = \frac{V_m'}{I_m} = \frac{Z_m}{n^2}, \text{ with matching Transformer} \quad (9)$$

매칭 트랜스포머를 추가할 경우, 전압 이득은 n 배만큼 줄어들고, 입력 임피던스는 n^2 배만큼 증가하게 된다. 따라서 입력 전류는 전체적으로 n 배만큼 증가하게 되고, 여기서 트랜스퍼머는 강압형이므로 입력 전류는 $1/n$ 배만큼 감소하게 된다. 그럼 5의 등가회로를 PSpice를 통하여 주파수 해석을 하게 되면, 그림 6과 같이 나타낼 수 있다. 여기에서 $N=1/n$ 을 나타낸다.

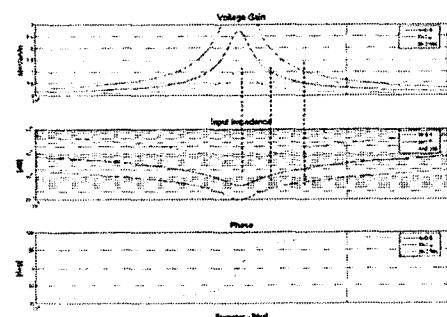


그림 6. 전압 이득과 입력 임피던스의 주파수 해석
Fig. 6 Frequency Analysis of Voltage Gain and Input Impedance

그림 6을 살펴보면, 전압 이득은 강압비가 클수록 줄어들고, 동일한 전압 이득에서 입력 임피던스의 크기는 증가하는 것을 알 수 있다. 또한, 강압형 매칭 트랜스포머를 사용하여 스위칭 주파수를 공진 주파수에 위치시키면, 전압과 전류가 동상이 되어 무효 전력 성분을 크게 줄일 수 있다.

2.2 실험 결과

강압형 매칭 트랜스포머의 특성을 검증하기 위하여, 30kW급 비접촉 직렬 공진 컨버터를 제작하여 실험하였다. 실험 사양은 아래와 같다.

입력 전압 : 3상 220Vac

출력 : 24kW(300V/80A)

트랙 길이 : 30m

풀브리지 직렬 공진 컨버터 방식 적용

매칭 트랜스포머 권선비 : 2:1

아래 그림 7은 매칭 트랜스포머를 추가하지 않았을 때(a)와 추가하였을 때(b)의 스위치단의 출력 전압과 공진 전류, 그리고 출력단의 출력 전류를 나타내고 있다. 그림에서 나타난 것과 같이 매칭 트랜스포머를 추가하면 동일한 출력에서 공진전류의 값이 1/2로 줄어드는 것을 알 수 있고, 또한 전압과 전류의 위상이 거의 일치

하여 무효 전력 성분이 크게 줄어드는 것을 알 수 있다.

[참 고 문 헌]

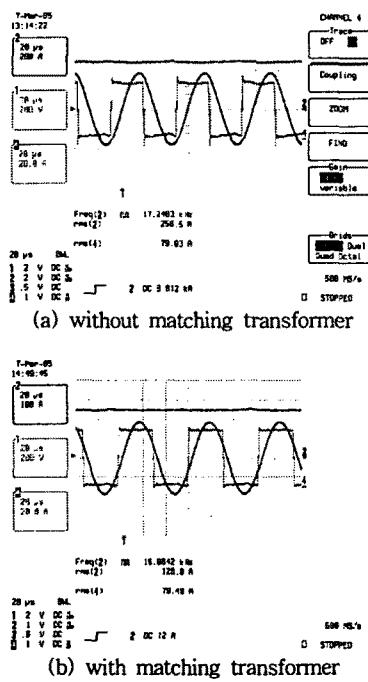


그림 7. 실험 결과
Fig. 7 Experimental Result

3. 결 론

본 논문에서는 비접촉 공진형 컨버터와 같이 누설 인덕턴스가 큰 공진형 컨버터의 스위치단과 공진 맹크단 사이에 강압형 매칭 트랜스포머를 추가하여 스위치단에 흐르는 공진 전류를 줄여 스위치의 손실을 줄이고자 하였다. 강압형 매칭 트랜스포머의 특성을 해석하기 위하여, 먼저 비접촉 변압기의 동가회로를 해석하였으며, 강압형 매칭 트랜스포머를 추가하였을 때의 전압 이득과 입력 임피던스의 주파수 해석을 통하여 입력 전류의 크기가 감소하는 것을 알 수 있었다. 마지막으로, 강압형 매칭 트랜스포머의 특성을 검증하기 위하여, 2:1 강압형 트랜스포머를 추가한 30kW급 비접촉 직렬 공진 컨버터를 제작/실험하였다. 실험을 통하여 동일한 이득에서 입력 전류의 크기는 1/2로 감소하였다.

[1] G. B. Joung, and B. H. Cho, "An Energy Transmission System for an Artificial Heart Using Leakage Inductance Compensation of Transcutaneous Transformer", in IEEE Trans, PE, Vol. 13, 1998.

[2] A. Ghahary, and B. H. Cho, "Design of a Transcutaneous Energy Transmission System Using a Series Resonant Converter", in IEEE Power Electronics Specialists Conf. Rec., 1990, pp.1-8

[3] Robert L. Steigerwald, "A Comparison of Half-Bridge Resonant Converter Topologies," IEEE Trans. Power Electronics, vol. 3, pp. 174-182, Apr. 1988.

[4] Don A. G. Pedder, Andrew D. Brown, J. Andrew Skinner, "A Contactless Electrical Energy Transmission System", in IEEE Trans, industrial electronics, Vol. 46, No. 1, 1999.

[5] Yungtaek Jang and Mila M. Jovanovic, "A Contactless Electrical Energy Transmission System for Portable-Telephone Battery Charger", in IEEE Trans, industrial electronics, Vol. 50, No. 3, 2003

[6] 공영수, 김은수, 이현관, "낮은 커플링 변압기를 갖는 비접촉 전원의 개선된 고효율 공진 컨버터", 전기학회논문지 548권 1호 2005년 1월