무전극등 자려식 안정기 설계 연구

(A Study on the Design of Self-oscillating Ballast for Electrodeless Lamp)

한수빈* · 박석인 · 정학근 · 정봉만 · 유승원
(Soo-Bin Han · Suck-In Park · Hak-Guen Jeoung · Bong-Man Jung · Seong-Won You)
한국에너지기술연구원

Abstract

Power supply technique for electrodeless lamps, especially self-oscillation method, is presented in this paper for Endura of Osram. The power supply uses differenct method for high efficiency at high frequency operation compared to the conventional method using saturable transformer. Exact parameter tuning using simulation is suggested for effective design for real applications.

1. 서 론

전극이 없는 무전극 램프에서는 전자유도법칙의 원리를 이용하여 가스를 방전시켜 발광한다[1] [2]. 따라서 전극으로 인한 수명의 영향이 없어서 통상적으로 6만시간 이상의 장시간의 동작이 가능하다.

통상 무전극램프 시스템의 구성 부분은 크게는 무전극 램프와 무전극 램프를 구동하기 위한 외부 고주파 전원부, 외부전원을 통해서 무전극등이 유도 방전할 수 있도록 하는 에너지 유도코일부, 유도코일이 효과적으로 동작하기 위한 임피던스 정합부로 나눌 수 있다. 여기에서 RF유도코일은 제품에 따라 램프의 내부에 설치되는 경우와 외부에 설치되는 경우가 있는데 Endura의 경우는 램프의 외부에 설치되어 있고[3] QL의 경우는 내부에 설치되어 있다[4], 임피던스 정합부분의 경우는 대부분 고주파전원장치 안에 같이 설치되게 되므로 무전극 램프의 전원장치는 시스템 효율에 대한 결정적인 영향을 주게 된다.

전원장치의 가격은 사용된 회로방식에 따라 차이가 있게 되는 데 현재 상업적으로 가장 가격을 낮출 수 있는 방식은 자려식 발진에 의한 방식이며 이는 초창기 형광등용 안정기에서 널리 사용된 바 있다. 형광등의 경우 동작 주파수가 20kHz -50kHz정도로 자려식 발진방식의 구현에 문제가 없었으나 무전극등의 경우는 수백kHz이상의 동작이 요구되므로 자력식 발진방식은 상대적으로 매우 난해 하게 된다. 따라서 본 논문은 오스람사의 Endura 무전극 램프에 대한 전원장치를 자려식 인버터로 구성할 수 있는 설계방안에 관한 연구하였고 이를 실험을 통해서 무전극 램프에서도 자려식 발진 방식이 유용한 방식임을 보였다.

2. 자려식 발진 인버터의 구조 및 동작

기존의 자화트랜스를 사용한 자려식 발진 인버터와 달리 고주파수에서의 동작이 가능하기 위해서는 자려식 발진 인버터의 구조는 그림 1과 같이 하프브리지(Half bridge) 구조이나 영전압모드로 동작되도록 하는 Class-D의 형태를 사용한다. 그리고 자려발진을 위해서 인덕터의 전류를 게이트 구동신호로 피이드백시키게 된다. 이것을 제어시스템 측면에서 블록화하여 보면 그림 2와 같은 시스템연결이 된다고 볼 수 있다. 그림에서 G(s)는 공진회로부, 전류 피이드백 회로 이득 1/N, H(s)는 게이트 구동부 그리고 인버터 스위치회로로 구분할 수 있다.

시스템이 발진을 일으키기 위해서는 소위 Barkhausen 이론에 의해 피드백시스템은 단일루프게인(Unit Loop Gain)이 되어야 하는데 이는 식 (1)과 같이 크기는 1이고 위상각은 2π의 배수가 되어야 한다는 것이다[5].

$$G(s)H(s)I(s)_{s=jw} = 1\angle 2k\pi \qquad (1)$$

즉 피이드백은 반드시 positive여야 하며(입력신호와 동상을 의미) 증폭기는 반드시 전체 loop gain은 최소 1이 되도록 해야 한다. 그 방식으로는 출력신호가 해당주파수에서 0도의 위상차를 갖는 필

터를 통해서 비반전 입력(Non-inverting input)에 연결되거나 또는 180도의 위상차를 갖는 필터를 통해서 반전입력(inverting input)에 입력되면 된다. 게이트 드라이브단에서 MOSFET의 게이트 전압과 피이드백된 전류 Is/n의 위상차가 θ라면 자화전류는 다음과 같다.

$$I_m = \frac{V_z}{L_m}(t - \frac{\frac{\pi}{2} - \theta}{\omega}) \quad (2)$$

식에서 Lm은 2차측에서 본 자화인덕턴스이고 Vz는 제너다이오드의 항복전압이다.

Barkhousen criterion이 성립하기 위해서는 궁극적으로는 그림 3과 같이 출력의 필터의 인덕터 전류와 인버터의 전압사이의 위상차 ϕ와 게이트 구동전압과 피이드백 전류의 위상차 θ가 서로 같아야 한다.

$$\text{즉} \quad \frac{I_p}{N}\sin\theta = \frac{\pi V_z}{2\omega L_m} \quad (3)$$

또는

$$\frac{V_z}{4fL_m} = \frac{|I_p|}{n}\sin\theta \quad (4)$$

여기서 RLC 필터의 인덕터 전류는 다음과 같이 결정된다.

$$I_p = \frac{2V_B}{\pi Z_o}\sqrt{\frac{1+(R_{load}/Z_o)^2 f_n^2}{(R_{load}/Z_o)^2(1-f_n^2)+f_n^2}} \quad (5)$$

이때 인버터 출력의 전압과 전류의 위상차는 다음과 같다.

$$\Psi = \arctan\left(\frac{R_{Load}}{Z_o} f_n\left(f_n^2 + \left(\frac{Z_o}{R_{Load}}\right)^2 - 1\right)\right) \quad (6)$$

식에서 $Z_o = \sqrt{\frac{L_r}{C_r}}$, $f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_r C_r}}$, $f_n = f/f_o$

Ip에 대해서 식(5)를 이용하여 해석적으로 구할 수 있으나 실제 설계를 위해서는 Ip와 θ의 측정치를 구하고 주파수 f를 정하고 Vz는 9V-15V사이에서 정하는 것으로 하여 권선비 N과 인덕턴스를 구하는 것이 실용적이다. 트랜스에서 이 권선비에 따라 주어진 코아에 대해 AL값이 정해지면 인덕턴스와 권선수는 서로 종속적인 관계를 갖게 되므로 결정이 같이 된다.

예로서 출력 150W인 경우 rms전압을 180V일 때 등가적인 램프저항은 $R_{load} = (V_s)^2/P_o$로 216ohm가 되고 필터값이 Cs=0.22uF, Cp=3.3nF, Ls=150uH라고 할때, Ip=1.59A, 위상차는 57.3°로 Vz=9.1V, n=10이라고 하면 필요한 Lm=71uH가 된다. 이 계산에서 게이트의 캐패시턴스는 무시하였지만 주파수가 높아지면 고려하여야 한다.

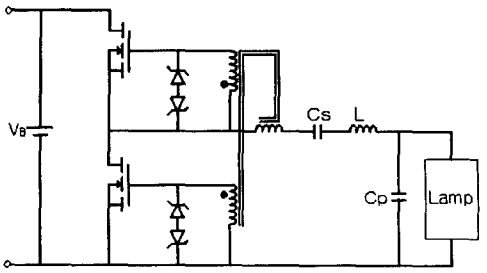

그림 1 자려식 안정기 인버터 회로
Fig.1 Self-oscillation inverer

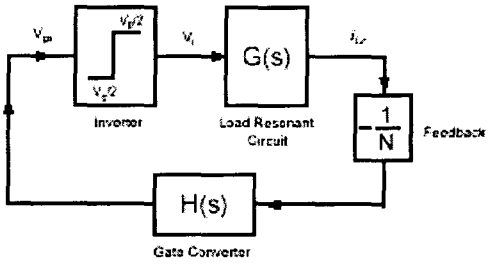

그림 2 자려식 안정기 인버터 회로의 블록 구분
Fig. 2 Transfer function of ballast inverer

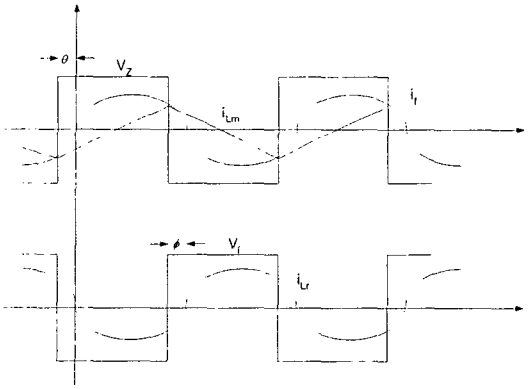

그림 3 자료 발진시의 회로 파형
Fig.3 Circuit waveform for self-oscillation

3. 시뮬레이션에 의한 파라메터 조정

식 (4)의 경우 자려발진 조건을 명확하게 규정한 것처럼 보여 쉽게 설계 조건을 결정할 수 있을 것으로 보이지만 실제로는 각 파라메터가 서로 연관되어 있어 정확한 파라메터값 결정이 어렵다.

예로서 인덕터 전류크기인 Ip의 경우 필터와 램프의 회로 파라메터에 의해 결정되면서 Vz, Lm, f에 따라 바뀌게 된다. 뿐만아니라 MOSFET의 내부 캐패시턴스값등 여러 회로의 표류성분 등이 고려가 되지 않고 있기 때문에 실제 값은 쉽게 결정되지 않는다.

따라서 본 논문에서 제안하는 것은 자려발진인버터의 효과적인 설계를 위해서는 식 (4)의 물리적인 의미를 이용하면서 그림 4와 같은 시뮬레이션 회로를 통해 결정하는 것이다. 식 (4)의 경우 자려인버터의 실제 동작주파수 fs는 Vz가 작아지거나 Lm이 커지거나 피이드백 된 전류가 커지면 감소하게 되고 반대의 경우는 증가한다는 것을 의미하고 있다. 그림 4의 경우 전류트랜스포머는 2차측에서 종속 전류원과 자화인덕턴스가 병열로 연결된 것으로 모델링하였다.

시뮬레이션 결과는 그림 5의 경우 n=5, Lm이 32uH인 경우이며 이때 Ip는 1.28A, θ는 약 62°도이다. 이 경우 식(4)로 계산한 경우 주파수는 340kHz이지만 시뮬레이션상에서는 MOSFET내부의 캐패시턴스를 고려하였기 때문에 322kHz로 약간의 오차가 존재한다. 그림 6의 경우 Lm이 71uH인 경우로 Ip는 1.28A 이 경우는 θ는 30.3°도 실제 222kHz가 되나 계산상은 267kHz이다. 그림 7의 경우 n=3, Lm이 32uH인 경우로 Ip는 1.33A, θ는 47°도로 계산주파수는 236kHz이나 시뮬레이션 주파수는 271kHz이다.

결론적으로 피이드백 전류가 커질수록 또는 자화인덕턴스가 클수록 동작주파수는 작아짐을 확인할 수 있으나 식에 의한 계산치는 항상 오차가 수반되게 되고 실제 완성된 회로에서의 동작주파수와는 차이가 있게 된다. 따라서 시뮬레이션을 통하여 파라메터를 다시 조절할 경우 비교적 오차가 적은 설계 값을 결정할 수 있게 된다.

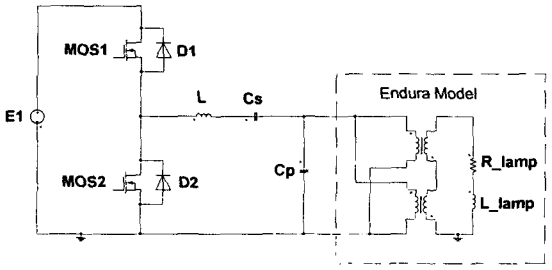

그림 4 필터와 램프를 포함한 안정기 인버터 회로
Fig.4 Ballast inverter circuit including the matching fiter and lamp

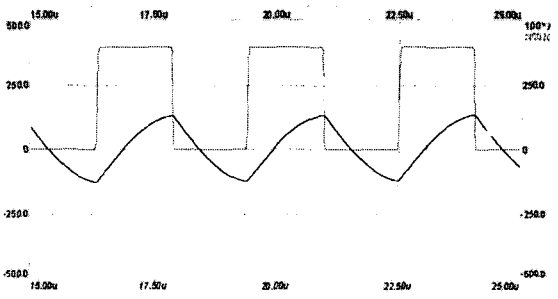

그림 5 n=5,Lm=32uH일때의 인버터 전압, 전류
Fig.5 Inverter waveform at n=5, Lm=32uH

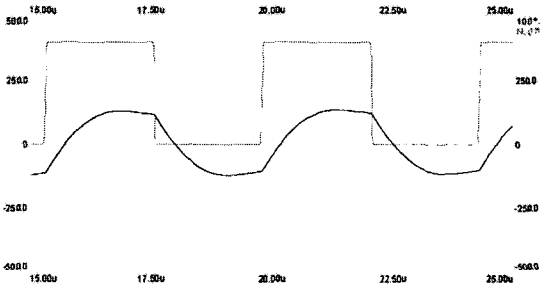

그림 6 n=5,Lm=71uH일때의 인버터 전압, 전류
Fig.6 Inverter waveform at n=5, Lm=71uH

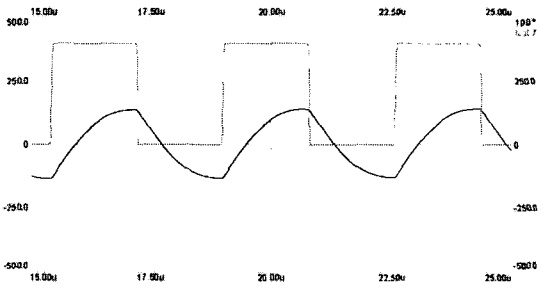

그림 7 n=3,Lm=32uH일때의 인버터 전압, 전류
Fig.7 Inverter waveform at n=3, Lm=32uH

그림 8은 시뮬레이션상에서 조정된 자려식 회로의 결과로 램프의 1차측의 전압, 전류파형이다. 전압의 피크값은 약 250V정도이며 전류의 피크값은 약 1.1A이며 위상각은 약 23°가 된다. 그림 9는 실험에 의한 램프전압, 전류 파형이며 시뮬레이션 결과와 비교할 때 거의 일치하고 있다. 따라서 안정기의 구조 및 매칭회로에 따른 램프의 전압, 전류 등의 동작을 미리 파악할 수 있게 되어 정확한 사전 설계에 적절히 이용될 수 있다.

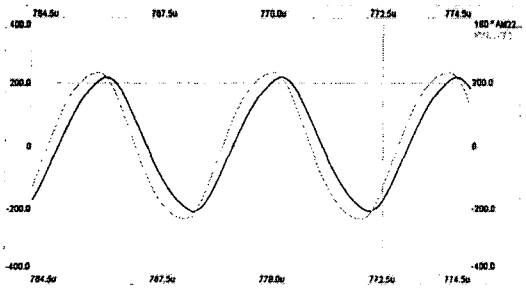

그림 8 램프 전압, 전류의 시뮬레이션 파형
Fig.8 Simulation waveform of lamp voltage/current

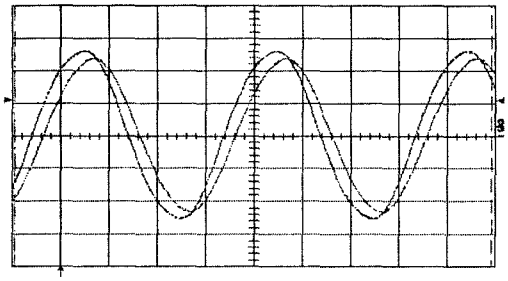

그림 9 램프의 전압, 전류 실험 파형(1usec/div)
Fig.9 Experiment waveform of lamp voltage/current

4. 결 론

본 논문에서는 엔두라 무전극 램프에 대한 자려식 안정기의 설계 방식에 대해서 기술하였다. 안정기에 있어서 이론적으로 파라메터를 계산하는 방식을 보완하기 위해서 시뮬레이션 방식을 제안하였다. 적절히 활용할 경우 설계시 오차를 크게 줄일 수 있음을 보였다.

참 고 문 헌

[1] J. M. Anderson, "Electrodeless Fluorescent Lamps Excited by Solenoidal Electric Field" Illum. Eng. vol. 64, no. 4, pp.236-245, 1969

[2] L. R. Nerone, "Mathematical Modeling and Optimization of the Electrodeless, Low-Pressure, Discharge System", IEEE Conference of Industry Applications Society, pp.509~514, 1993

[3]"Philips QL lamp systems, Product Information", Philips

[4]"Osram Endura: Guideline for luminaire manufactures and users", Osram

[5] C. Chang, J. Chang, and G. Bruning, "Analysis of the Self-Oscillating Series Resonant Inverter for Electronic Ballasts," IEEE IAS, pp.2291~2298. 1997