

엔두라 무전극 램프용 안정기 개발을 위한 모델 및 시뮬레이션 연구

한수빈, 박석인, 정학근, 김규덕, 정봉만
한국에너지기술연구원

Modeling and Simulation of Endura Electrodeless lamp system

Soo-Bin Han, Suck-In Park,, Hak-Kun Jung, Gue-Duck Kim, Bong-Man Jung
Korea Institute of Energy Research

ABSTRACT

Characteristics of electrodeless lamp as a load of the ballast is different compared to normal fluorescent lamp because the lamp includes the magnetics for inductive discharging process. So somewhat different modeling is necessary to make a proper power match between the lamp and ballast. Modeling of an electrodeless lamps, Endura of Osram, is presented in this paper. Simulation with a result of experiment is given for a verification of proposed model.

1. 서론

최근에 우리나라에서도 많이 보급되기 시작한 무전극 램프는 형광등이나 기타 HID등과 달리 필라멘트나 전극이 없이 발광되어 통상 6만시간이상의 높은 수명을 보장하게 된다. 통상 무전극램프는 외부 고주파 전원을 통해서 무전극등이 유도 방전할 수 있도록 하는 에너지 유도코일부를 어떠한 형태로든 갖게 된다. 오슬람의 Endura 램프와 같은 경우는 관의 외부에 코아를 두고 있고 필립스의 QL 램프와 같은 경우는 관의 내부에 코아를 두고 있다[1][2].

램프와 안정기의 효율적인 상호작용을 위해서는 안정기 내부에 임피던스 정합의 역할을 하는 부분이 내장되는데 무전극 램프와 같이 대부분 고주파로 동작하는 경우 정합의 여부에 따라 시스템 효율에 대한 큰 영향을 주게 된다. 적절한 정합의 여부는 사실 램프의 동작특성이 잘 파악된 상태에서 가능한데 해석적으로 또는 시뮬레이션상에서 정합치의 결정을 위해서는 램프에 대한 모델이 필요하게 된다. 램프의 모델은 매우 다양한 방식으로 도출할 수가 있는데 각각의 장단점이 존재한다. 본 논문에서는 안정기의 설계와 관련하여 직접적으로 이용될 수 있는 회로적 표현에 의한 램프의 모델을 사용하였고 대상은 현재 우리나라에서 많이 사용되고 있는 오스람사의 Endura 무전극 램프에 대해 수행하였고 램프 모델을 이용한 시뮬레이션과 실험 결과를 보였다.

2. 마그네틱스를 포함한 램프 모델

본 논문에서는 오스람사의 엔두라 램프를 대상으로 하기로 한다. 광원의 구조는 그림 1과 같이 전체적으로는 굽은 직관형 형광등 2개를 결합한 형태이다. 광원의 길이는 150W의 경우 350mm이며 관의 두께와 넓이는 139mm이다. 또한 램프 외부에 페라이트코아를 2개를 설치하고 있는데 이를 통해서 RF유도방식에 의해 램프내부의 가스에 에너지를 전달하여 방전시키는 형태이다.

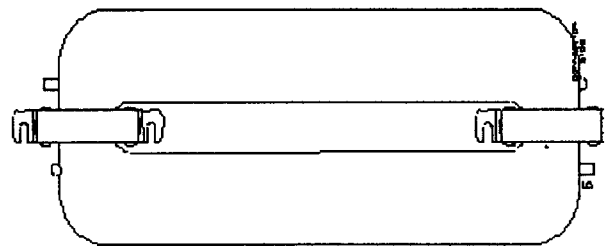


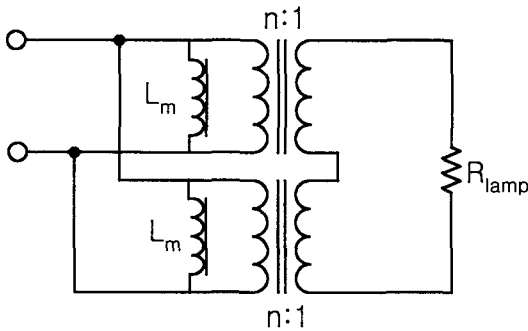
그림 1. Endura 램프의 모양
Fig. 1. Shape of Endura lamp

램프 자체만으로 본다면 기존의 형광등과 크게 다른 점은 없으며 따라서 램프의 모델도 다음과 같은 식에 의해 정의되는 저항으로 볼 수 있다. 물론 플라즈마의 길이에 따른 인덕턴스 성분은 존재하지만 매우 작은 값이기 때문에 램프자체는 순수한 저항으로 근사화가 가능한 것이다.

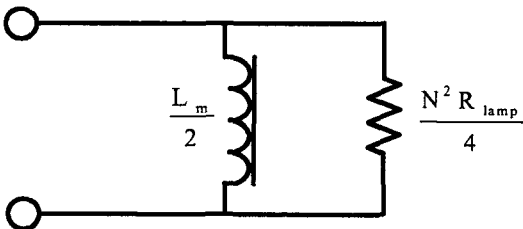
$$R_{eq} = \frac{V_{lamp}}{I_{lamp}} \quad (1)$$

그러나 무전극램프는 동작시 램프자체는 페루프를 형성하는 방전 플라즈마가 다수 턴으로 감긴 페라이트 코어를 통해서 마치 트랜스포모의 2차측에 1턴으로 결합된 것처럼 동작하는 것으로 볼 수 있다[3]. 따라서 안정기측에서는 그림 1과 같은 무전극램프는 단순한 저항으로 연결되는 것이 아니라 트랜스포모를 통해서 임피던스 변환이 생기면서 트랜스포모의 자화(magnetizing) 인덕턴스가 나타나게 되어 R-L부하로 연결된다.

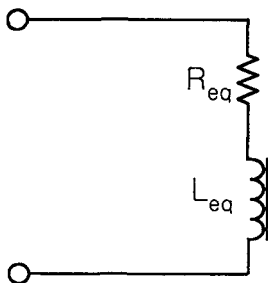
이러한 특성을 고려하여 Endura 무전극램프의 모델은 그림 2-(a)와 같이 나타낼 수 있게된다[4].



(a) 엔두라의 등가 모델



(b) 병렬 등가 회로



(c) 직렬 등가 회로

그림 2 엔두라 무전극 램프 모델
Fig. 2. Endura lamp model

자화인덕턴스 L_m 은 실제로는 트랜스포모의 내부 파라미터값이 된다. 램프저항 R_{lamp} 는 1차측 트랜스

포모에서 볼 때 $\frac{n^2 R_{lamp}}{2}$ 로 나타나며 이것이 병렬로 되므로 등가적인 모델은 그림 2-(b)와 같이 나타낼 수 있다. 궁극적으로 2개의 페라이트 코어의 병렬 결합은 권선수가 $n/2:1$ 로 되는 효과를 보이고 있다. 그림 2-(c)의 경우는 임피던스의 저항 성분과 인덕턴스 성분을 다음 식에 의해서 직렬연결로 나타낸 경우로 목적에 따라서는 이렇게 표현하는 것이 효과적일 수도 있다

$$R_{eq} = \frac{R_p (\omega L_p)^2}{R_p^2 + (\omega L_p)^2} \quad (2)$$

$$L_{eq} = \frac{R_p^2 L_p}{R_p^2 + (\omega L_p)^2} \quad (3)$$

단 식에서 R_p , L_p 는 각각 그림 2-(b)의 저항 및 인덕턴스 성분의 값을 의미한다.

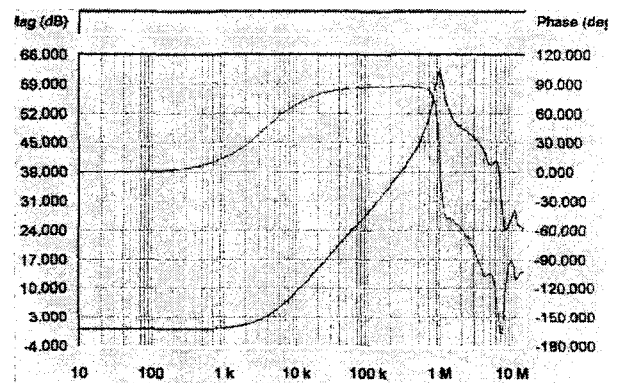


그림 3. 엔두라 램프 임피던스 측정
Fig. 3. Lamp impedance measurement

실제 램프의 자화인덕턴스의 값은 그림 3과 같이 램프의 1차측의 임피던스 측정을 통해서 파악할 수 있는데 250kHz에서의 인덕턴스는 약 500uH정도가 나타났다. 램프의 임피던스는 동작시 전력과 전류의 관계로 계산될 때 약 3ohm정도이다. 오슬람사에서 발표된 임피던스는 2.7ohm정도이므로 이 값을 시뮬레이션에서 사용하기로 한다.

3. 시뮬레이션 및 시험 비교

앞에서의 그림 2의 램프모델을 이용하여 그림 4와 같이 Parallel Loaded SRC의 회로형태의 안정기를 포함한 램프의 동작 시뮬레이션 회로를 구성할 수 있다. 시뮬레이션의 파라미터의 값은 $R_{lamp} = 2.7ohm$, $L_{lamp} = 0$ 이고 트랜스포모의 자화인덕턴

스는 각 1000uH로 2개가 1차측에서 병렬이므로 실제 500uH가 되게 된다. 필터에서는 L1=150uH, C1=0.22uF, C2=3.3nF을 사용하였다.

일단 LCC필터 회로만의 주파수 특성을 살펴 볼 필요가 있다. 램프에 인가되는 전압 즉 C2의 출력 전압의 무부하시의 주파수 특성은 그림 5와 같이 전형적인 특성을 보이고 있음을 알 수 있다. 단 이 경우 스위치와 인덕터의 손실을 고려한 결과이다. 그러나 실제 무전극 안정기에서의 점등전 주파수 특성은 트랜스의 자화인덕턴스가 존재한 상태로 보아야 하므로 이 경우 특성은 그림 6과 같이 나타나며 공진주파수의 위치가 오히려 높아지는 것을 알 수 있다. 또한 낮은 주파수에서 또 다른 공진점이 존재하지만 이 주파수에서는 실제 동작에 이용되지 않고 있으므로 무시해도 된다. 자화인덕턴스는 온도가 증가하면 증가하게 되므로 공진주파수의 위치는 낮아지며 이득의 크기는 커지게 된다.

램프가 점등된 후에는 등가 저항이 연결되므로 이때 LCC 필터 출력의 주파수 특성은 그림 7과 같이 된다. 이 경우도 온도가 증가하면 자화인덕턴스는 증가하게 되어 공진주파수가 떨어지면서 이득은 약간 증가하게 된다.

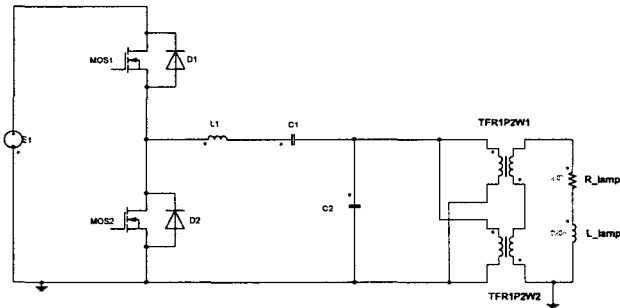


그림 4. 시뮬레이션도 회로
Fig. 4. Simulation circuit

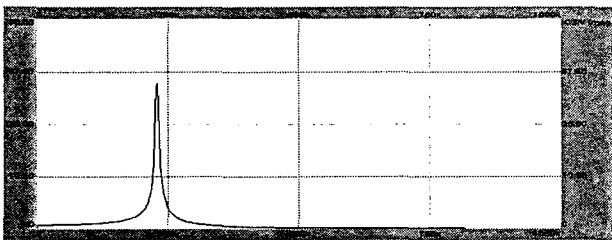


그림 5. LCC 필터의 주파수 특성
Fig. 5 Frequency characteristics of LCC filter

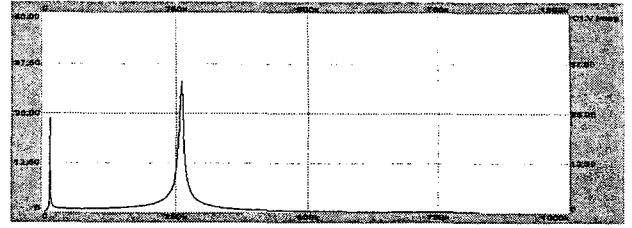


그림 6 자화인덕턴스 고려한 필터의 주파수 특성
Fig. 6 Frequency characteristics with magnetizing inductance

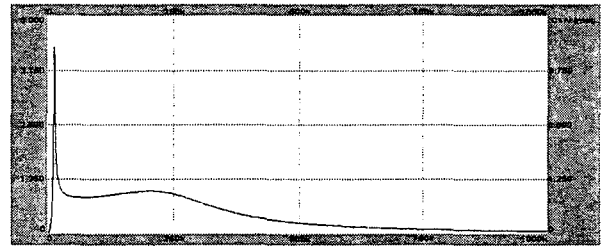


그림 7 램프가 점등된 경우 필터출력 주파수 특성
Fig. 7 Frequency characteristics after lamp ignition

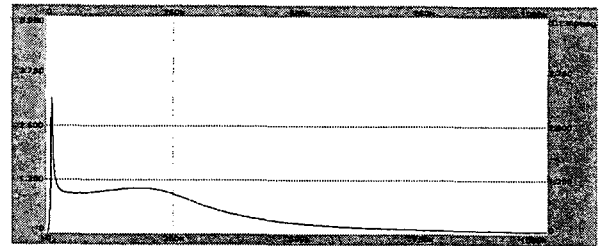


그림 8 온도가 상승되는 경우 주파수 특성변화
Fig. 8 Frequency characteristics for temperature rise

예로서 그림 8의 경우 온도가 상승하여 자화인덕턴스가 처음 500uH에서 1000uH로 증가한 경우의 주파수 특성을 보였다. 이와 같은 주파수 특성변화를 검토함으로써 처음 점등시 온도가 상승하기 시작하여 정상상태에 도달할 때까지 필터의 출력전압은 서서히 증가하게 됨을 알 수 있고 이와 관련된 적절한 동작 전압 및 주파수를 선택할 수 있게된다.

그림 9의 경우는 필터의 인덕터 전류 및 출력전압 그리고 전류의 위상으로서 모든 성분이 phase lag상태로 동작됨을 알 수 있다. 그리고 각 성분의 위상차를 예측할 수 있게된다. 이 위상의 특성도 온도가 증가하면 전체적으로 낮은 주파수쪽으로 이동하게 된다.

4. 결론

본 논문에서는 안정기의 설계와 관련하여 직접적으로 이용될 수 있는 회로적 표현에 의한 램프의 모델을 사용하였고 여러 경우의 상태에 대해서 주파수 특성을 파악하여 설계에 유용하게 사용할 수 있음을 보였다. 또한 시뮬레이션 결과를 실험결과와 비교하여 타당성을 보였다. 대상은 현재 우리나라에서 많이 사용되고 있는 오스람사의 Endura 무전극 램프에 대한 모델과 이를 이용한 시뮬레이션으로 제한하였지만 다른 무전극형태에 확대 적용이 가능하다.

참고 문헌

- [1] "Osram Endura: Guideline for luminaire manufactures and users", Osram
- [2] "Philips QL lamp systems, Product Information", Philips
- [3] L. R. Nerone, "Mathematical Modeling and Optimization of the Electrodeless, Low-Pressure, Discharge System", IEEE Conference of Industry Applications Society, pp.509-514, 1993
- [4] S. Ben-Yaakov, et al. "A Behavioral SPICE Compatible Model of an Electrodeless Fluorescent Lamp", IEEE Conference of APEC, pp. 948-954, 2002

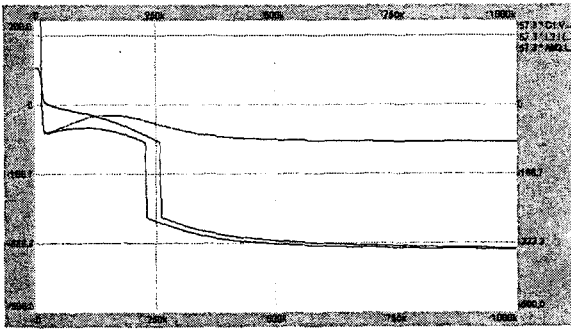


그림 9. 필터의 주요 성분의 위상특성
Fig. 9. Filter phase characteristics

그림 10은 시뮬레이션 결과로 나타난 램프의 1차측의 전압, 전류파형이다. 전압의 피크값은 약 250V정도이며 전류의 피크값은 약 1.1A이며 위상각은 약 23°가 된다. 그림 11은 실험에 의한 램프전압, 전류 파형이며 시뮬레이션 결과와 비교할 때 거의 일치한 것으로 램프 모델의 유용성을 볼 수 있다. 따라서 안정기의 구조 및 매칭 회로에 따른 램프의 전압, 전류등의 동작을 미리 파악할 수 있게 되어 정확한 사전 설계에 적절히 이용될 수 있다.

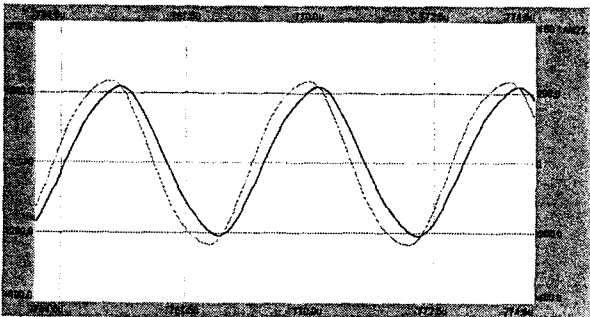


그림 10. 램프 전압, 전류의 시뮬레이션 파형
Fig. 10. Simulation waveform of lamp voltage/current

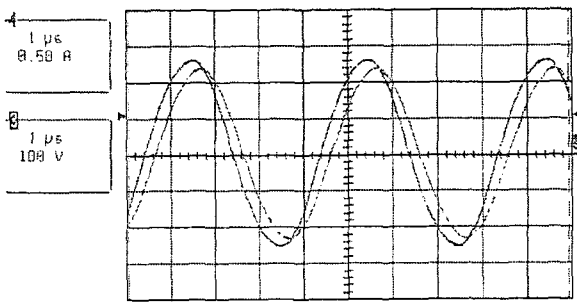


그림 11. 램프의 전압, 전류 실험 파형(1usec/div)
Fig. 11. Experiment waveform of lamp voltage/current