

# 최근의 방전등의 회로적 모델 기술 현황

한수빈 <한국에너지기술연구원 전기·조명연구센터장>

## 1 서론

최근에 조명기술은 다양한 신광원들의 등장으로 새로운 시장이 활성화되고 있다. 반도체 광원에 속하는 LED를 비롯하여 기존 가스 방전등 시장에서도 T5 형광램프, 무전극 광원 그리고 세라믹 메탈할라이드 광원 등이 등장하여 기존 시장에서 오랜 기간 동안 주류를 이루고 있는 광원들을 위협하고 있다.

광원을 구동하기 위해서는 광원에 전기적 에너지를 공급해주는 전원공급장치가 필요하며 가스 방전등용으로는 이들을 통상 안정기(Ballast)라고 지칭하고 있다. 광원이 정상적인 광속을 출력시키고 수명을 유지하기 위해서는 안정기에서 광원에서 요구하는 적절한 전압과 전류를 공급시킬 수 있어야 한다. 제 기능을 수행하는 안정기를 개발하기 위해서는 방전관의 특성을 잘 구현할 수 있는 회로적인 모델이 필요하게 된다. 여기서 회로적인 모델이라고 구분한 이유는 광원을 모델링하는 다른 모델도 가능하기 때문이다. 광원을 연구하는 기술자의 경우는 방전관 내부의 물리적 특성을 여러 물리적 파라미터를 포함한 방정식으로 모델링하기도 하나 이는 광원의 개발에 도움이 되는 모델일 수는 있어도 안정기를 개발하는 데 적절하지는 않아서 전기공학자들에게는 유용하지 않은 모델 방식이다. 회로적 모델이란 광원을 회로의 파라미터

로 구현할 수 있음을 의미한다. 즉 저항, 커패시턴스, 인덕턴스의 집합으로 모델링함을 의미한다. 광원의 회로적 모델들은 궁극적으로는 안정기를 연구하는 기술자들에 의해서 PSpice, ISpice, Matlab, Saber 또는 Simplorer 등의 회로 시뮬레이션 소프트웨어를 이용하여 안정기 회로를 개발하는데 이용된다.

본고에서는 왜 다양한 회로적 모델의 시도가 필요한가에 대한 기술적인 문제와 함께 형광등, 무전극 광원 그리고 고압방전등의 다양한 방전등에 대해 여러 회로적 모델 기술들의 활용에 대해서 고찰해보기로 하고 한다.

## 2. 형광등 램프의 정역 모델

형광등의 경우 그 특성을 모델링할 때 방전관이 프라즈마 상태로 변환되면 방전관의 형태와 가스 성분 등에 의해 결정되는 저항(resistance)성분을 갖는 순수한 저항기로 볼 수 있는 것은 오래전에 물리학자들에 의해 입증되었다. 따라서 전기공학자들은 가장 간단한 회로 성분인 저항으로 안정기를 모델링하여 설계하는 데에 이용하였다. 또한 그 저항 값은 다음식과 같이 단순히 관전압과 관전류에 의해서 쉽게 계산하여 사용하였다.

$$R_{lamp} = \frac{V_{lamp}}{i_{lamp}}$$

이 경우 관전압과 관전류는 정격의 용량에 도달하여 안정된 상태일 경우를 가정하여 계산한 것으로 통상 전자식 안정기의 개발은 정격의 단일 전력을 공급하기 때문에 단일 저항으로 램프를 가정하여도 큰 문제는 발생하지 않는다. 그러나 전원의 변동 또는 온도에 따른 램프 및 회로 파라미터의 변화 등을 포함하는 내외부의 외란에 의해 회로의 동작점이 변화하여 전력의 변화가 초래될 수 있을 때는 램프의 저항 값이 변하게 된다. 또한 조광제어를 목적으로 인위적으로 안정기에서 전력을 변화시킬 경우 역시 램프의 저항 값이 변화하게 된다. 보다 신뢰성 있는 안정기를 개발함에 있어서 정상상태가 아닌 동적상태에서의 램프의 변화하는 동작특성을 파악하여 회로에 반영하고자 하는 시도가 필요하게 된다. 따라서 최적화된 안정기의 성능을 위해서는 광범위한 영역에서의 램프의 동작 모델 및 정상상태 및 과도상태에서의 모델구현에 대해서 현재까지 지속적으로 연구가 수행되고 있다.

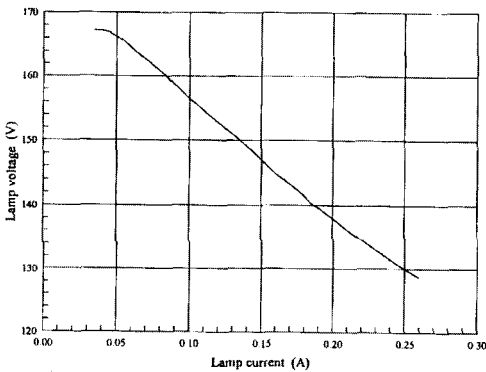


그림 1. T8 형광램프의 전압-전류 특성

우선 형광등의 경우 전력의 변화에 대해 임피던스가 변화함은 오래전부터 확인된 내용으로 이 변화에 대해 램프를 모델링하고자 하는 많은 방법이 존재한다. 예로서 그림 1의 경우는 T8 형광등의 램프의 전압, 전류 특성으로 전류가 증가하면 전압은 감소하는 특성을 보이고 있다. 이는 전형적인 가스 방전관의 음

저항(negative resistance) 특성인데 실제로는 램프의 공급 전력이 증가하면서 전류가 증가하고 전압은 감소하게 된다. 그림에서 전압, 전류상의 크기는 RMS(Root Mean Square)에 의해 계산된 크기임을 주의해야 한다.

결국 램프의 동작변화에 대해서 램프의 저항이 변화하게 되는 데 이를 모델링하는 방법 중의 하나는 그림 1과 같은 전압-전류 특성곡선을 아래식과 같이 curve fitting하여 구한다.

$$V_L(t) = A(P_L) * I_L(t) + B(P_L) * I_L(t)^3$$

위 식에서는 변수를 전류로 하였지만 목적에 따라 전압, 저항, 전력 등 다른 파라미터를 변수로 선택할 수 있다. 그림 2는 램프의 전압을 전류의 함수로 표현한 다음 위식을 사용하여 모델링한 것을 PSpice로 구현한 모델 회로이며 그림 3은 PSpice의 net list에 해당된다.

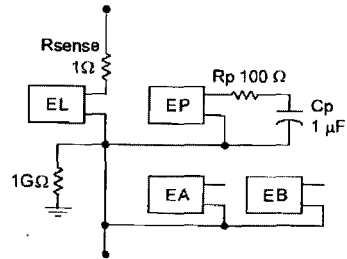


그림 2. 형광등의 PSpice 회로 모델 [1]

```
.SUBCKT 32WT8SYL 1 10
+ PARAMS: R1=10468, A2=-431.85, A3=21.641, A4=-0.30272
+ PARAMS: B1=700.7, B2=11.521, B3=-1.1311, B4=0.016615

Rsense 1 2 1; Current sensing resistor
EL 2 10 VALUE={V(1,2)*V(5,10)+V(6,10)*V(6,10)*V(6,10)}; Lamp voltage
EP 3 10 VALUE={V(1,10)*V(1,2)}; Instantaneous lamp power
Rp 3 4 100; Resistor value equals averaging time constant in microseconds
Cp 4 10 1uF IC=5V; Average lamp power
EA 5 10 VALUE={ A1/LIMIT(V(4,10),4,50)+A2+V(4,10)*(A3+V(4,10)*A4)}; Calculates A
EB 6 10 VALUE={ (B1/LIMIT(V(4,10),4,50)+B2+V(4,10)*(B3+V(4,10)*B4))*V(1,2)}; Calculates B*1
Rgnd 10 0 1G; Provides a DC path to ground
.ENDS 32WT8SYL
```

그림 3. PSpice회로의 net list[1]

### 3. 동적상태를 포함한 형광등 램프의 모델

형광등 램프의 안정기로 자기식 안정기보다 고주파수의 전자식 안정기가 보다 이용이 보편화됨에 따라 램프의 동적인 전압 전류 특성이 음저항(negative resistance) 특성이 아닌 양저항(positive resistance) 처럼 동작하는 것이 나타난다. 즉 그림 4와 같이 어느 정해진 램프전력에서 전압 전류의 파형은 전류가 증가하면 전압도 같이 증가하는 양저항 특성을 보이게 된다. 그리고 램프 전력이 바뀌면 전압-전류의 궤적이 달라지지만 양저항 특성을 유지하고 있다. 즉 고주파로 점등되는 형광등의 저항은 동적상태에서 양의 저항으로서 동작한다. 그러나 방전시의 임피던스의 고유 특성인 음저항 특성과 혼동이 되게 되는 데 정밀한 분석결과 정적인 특성은 음저항 특성이 나타나고 동적인 특성은 양저항 특성을 따른다는 것이 밝혀졌다. 이를 쉽게 설명한 것이 그림 5이며 빠른 전류의 변화에 대해서 A, B의 양저항 특성으로 변화하며 동시에 램프 전력이 변화하면  $R_s$  선을 따라 음저항 특성이 나타나게 된다. 그림에서 램프 전력은  $P_4 > P_3 > P_2 > P_1$  순서로 변화한다. 이를 실제 파형에서 확인하여 보면 그림 6과 같다. 그림에서 램프전력이

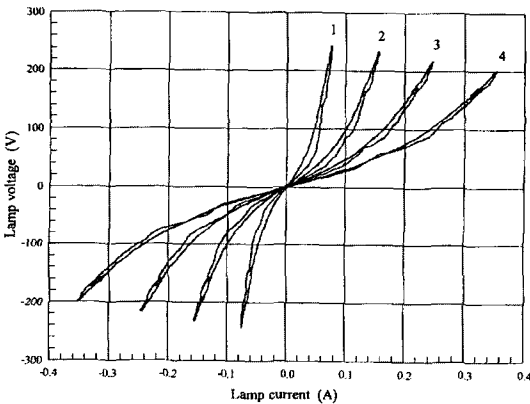


그림 4. 형광등의 여러 램프전력에 대한 동적특성 변화 (램프 전력은  $P_4 > P_3 > P_2 > P_1$ )

변화하기 전에는 램프의 전류 파형과 전압파형은 비례하여 변화하는 양저항 특성을 보이지만 램프전력이 바뀌면 전압 전류의 순시 파형은 비례하면서 전압의 크기는 감소함에 따라 전류의 크기는 증가하는 음저항 특성이 나타남을 볼 수 있다.

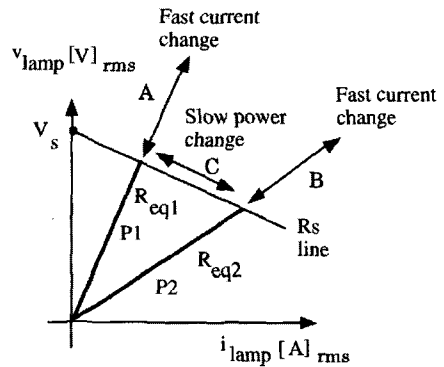


그림 5. 형광등의 동적특성과 정적특성의 관계( $P_2 > P_1$ )

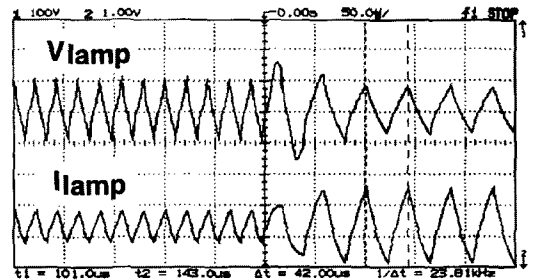


그림 6. 램프 전력이 변할때의 전압, 전류의 파형 변화

이러한 특성을 모델링하는 방식은 그림 7과 같고 회로의 변수들은 다음과 같이 정의된다.

$$E_1 = i(\text{lamp})^2, \quad E_2 = \sqrt{v(\dot{p})}$$

$$G_1 = \frac{v(\text{lamp})}{\frac{V_s}{v(\text{ms})} - R_s}, \quad v(\text{ms}) = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [i(\text{lamp})]^2 dt}$$

이 모델에서는 램프의 저항은 전압-전류 특성 곡선과 전류의 RMS값으로 계산하고 순시전압에 램프의 저항을 나누어서 램프의 순시전류를 구한 후에 이 순시전류를 일정한 시정수를 갖는 필터를 통과시키고 그 값들의 RMS를 구하고 다시 이를 램프의 순시저항에 순환시켜서 반복해서 램프의 순시전압 및 순시전류를 구하게 된다. 그 결과는 그림 6의 실험치와 거의 유사하게 정상상태와 과도상태에 대한 변화 경향을 구현할 수 있게 된다.

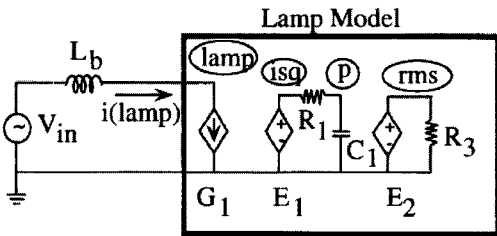


그림 7. 동적 특성을 포함한 형광등의 램프 모델(2)

#### 4. 무전극 형광등의 회로적 모델

램프 자체만으로 본다면 기존의 형광등과 크게 다른 면은 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 가능하다.

$$R_{eq} = \frac{V_{lamp}}{I_{lamp}}$$

중요한 것은 무전극 램프는 동작시 램프자체는 페루프를 형성하는 방전 플라즈마로서 1차측에서 다수 턴으로 감긴 페라이트 코어(ferrite core)를 통해서 마치 트랜스포머의 2차측에 1턴으로 결합된 것처럼 동작하는 것으로 볼 수 있다. 이 물리적인 현상을 모

델링하면 그림 8과 같게 된다. 여기에서 회로의 주요 파라미터는 1차측 인덕턴스  $L_1$  및 2차측 인덕턴스  $L_2$  그리고 상호인덕턴스인  $M$ 과 램프 플라즈마의 임피던스 저항  $R_p$ 이다. 트랜스포머의 내부 저항  $R_s$ 는 대체적으로 무시할 수 있다. 상호인덕턴스  $M$ 은 결국 결합계수(coupling factor)와 관계되며 이들은 파악하기가 쉽지 않다. 따라서 물리적 의미에서 직관적으로는 적합한 모델이지만 회로측면에서 이용하기 위해서는 보다 실용적인 모델이 필요하며 따라서 그림 9와 같은 모델을 많이 선호하게 된다. 여기에서는 안정기 측에서는 무전극 램프는 트랜스포머를 통해서 임피던스 변환이 생기면서 트랜스포머의 1차측에서 등가적인 인덕턴스와 저항의 구성으로 나타난다. 이때 안정기 입력측에서 본 등가 인덕턴스는 거의 트랜스포머의 자화(magnetizing) 인덕턴스  $L_M$ 에 가깝고 등가 저항은 램프의 저항  $R_{Lamp}$ 에 권선비  $n$ 의 제곱만큼 나타나게 된다.

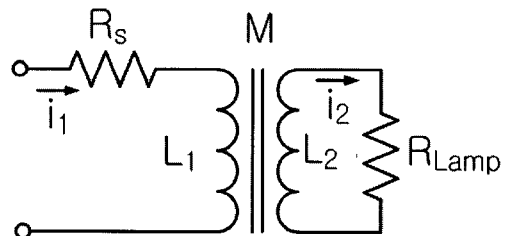


그림 8. 무전극 램프의 물리적 특성 모델(3)

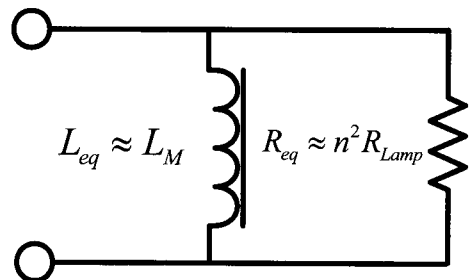


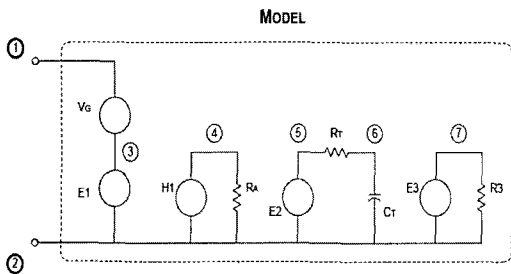
그림 9. 무전극 램프의 실용적인 모델

## 5. HID광원의 회로적 모델

HID 광원도 램프가 완전히 방전된 상태만으로 본다면 기존의 형광등과 같이 저항으로 볼 수 있다. 따라서 정상상태에서의 모델은 형광등과 유사한 방법으로 모델을 구현할 수 있고 하나의 방법으로 다음 식과 같이 순시전력에 대해 순시전압을 구할 수 있다.

$$V_{L(t)} = \left( \frac{A}{I_{Lrms}^2} + \frac{B}{I_{Lrms}} \right) I_{L(t)}$$

이때 램프의 저항은 파라미터 계수 A, B와 전류의 RMS값에 의해서 구하게 된다. CDMR70W830PH 램프에 대해 A=1.96625 B=89.9368를 갖고 회로



.subckt CDMR70W830PH 1 2 params: A=1.96625 B=89.9368

Vg 1 3 0

H1 4 2 Vg 1

Ra 4 2 1

E2 5 2 value={V(4,2)\*V(4,2)}

Rt 5 6 100

Ct 6 2 1u ic=10

E3 7 2 value={sqrt(V(6,2))}

Rb 7 2 10

E1 3 2 value={{(A/V(7,2)\*V(7,2)+B\*V(7,2)) \*V(4,2)}

.ends CDMR70W830PH

그림 10. HID 광원의 PSpice 모델 및 net list(4)

로 구현한 예가 그림 10이다.

그러나 HID 광원의 경우 고압방전등이라 점화(ignition)에서 정상상태로 도달하는 과정이 형광등과 매우 다르고 통상 수분대의 많은 시간이 필요하기 때문에 이에 대한 특성을 모델링하고자 하는 시도가 있다. 그중에 하나가 그림 11과 같은 것으로 여기에서는 Arc column의 모델과 전극에서의 전압강하 등에 대한 모델을 물리적 방정식에 기초하여 PSpice 회로로 구현하고 있다. 각 성분의 net list는 매우 복잡하므로 참고문헌 [5]를 참조하기 바란다.

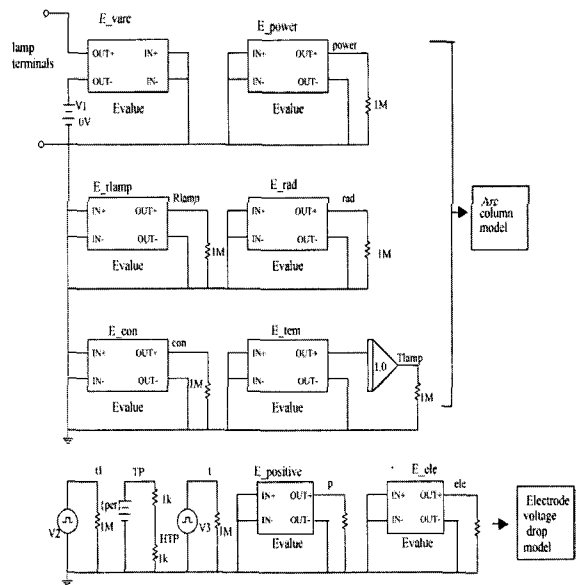


그림 11. 일반화한 메탈할라이드 광원의 회로적 모델(5)

## 6. 결 론

현재 형광등을 비롯하여 무전극 광원 그리고 HID 광원에 대한 모델링 연구는 지속적으로 발전하고 있다. 이제는 단순한 정상상태에서의 모델의 차원에서 과도상태 그리고 온도에 따른 영향을 고려한 모델 그리고 조광시의 변화 등에 대해 심도있게 연구되고 있다. 특히 HID 광원의 경우는 아직 모델링 측면에서

많은 부분이 더 개선될 필요가 있어 향후에도 메탈헬라이드 광원을 중심으로 지속적인 연구가 수행될 것으로 보인다. 이러한 회로적 방식에 의한 광원의 모델은 안정기의 설계에 적극적으로 이용되고 정합성, 점등, 온도변화에 대한 적응성 기타 전기적인 특성 등을 파악하는데 매우 유용하므로 많은 전기기술자들이 적절히 활용해야 할 것으로 보인다.

### 참 고 문 헌

- [1] Mark Sun, et al, "PSpice High-Frequency Dynamic Fluorescent Lamp Model" IEEE Trans. Power Elec., Vol. 13, No. 2, pp. 261-271, 1998.
- [2] Shmuel Ben-Yaakov, et al "Statics and Dynamics of Fluorescent Lamps Operating at High Frequency: Modeling and Simulation", IEEE Trans. Ind. Applicat., Vol. 38, No. 6, pp. 1486-1492, 2002.
- [3] L. R. Nerone, "Design of a 2.5-MHz, Soft-Switching, Class-D Converter for Electrodeless Lighting", IEEE Trans. Power Elec., Vol. 123, No. 3, pp. 507-516, 1997.
- [4] J. Correa, et al, "Dimming in Metal-Halide and HPS Lamps operating at HF: Effects and Modeling" Industry Applications Conference, pp. 1467-1474, 2002.
- [5] Wei Yan et al, "A Universal PSpice Model for HID Lamps", IEEE Trans. Ind. Applicat., Vol. 41, No. 6, pp. 1594-1602, 2005.

### ◇ 저 자 소 개 ◇



**한수빈 (韓秀彬)**

1958년 6월 9일생. 1977년 한양대학교 전자공학과 졸업. 1986년 한국과학기술원 전기및전자공학과 졸업(석사). 1997년 한국과학기술원 전기및전자공학과 졸업(박사). 현재 한국에너지기술연구원 전기·조명연구센터장. 한국조명·전기설비학회 편수위원.