

## 무전극 램프 조광제어를 위한 모델링 연구

장태은, 김희준

한양대학교

### A Study on the Modeling on the Dimming Control of Electrodeless Fluorescent Lamps

Tae Eun Jang and Hee Jun Kim

Hanyang University

**Abstract** - This paper presents a study on the modeling on the dimming control of electronic fluorescent lamp. The resulted models of the lamps were applied the two dimming control methods, one is the variable switching frequency and the other is the variable dc link voltage method. And the comparison of the dimming characteristics between the two methods was presented.

Theoretical predictions were verified the experimental results on a 100W electrodeless fluorescent lamp.

#### 1. 서 론

무전극 램프는 전극을 필요로 하지 않기 때문에 장수명을 가지며 안정기의 출력변화에 대해서도 아주 강한 특성을 갖는다. 최근 대형건물, 시설 및 공장등 대규모 조명설비가 시설된 장소에 대해서 자연 조도등의 주변조건에 따라 램프의 광출력을 제어 함으로써 전력소비를 절감하게 하는 조광제어 방법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 무전극 램프의 조광제어에 있어 어려운 점은 램프전력에 따라 램프의 특성이 변화하는 것이다. 현재까지 무전극 램프의 모델은 램프전력에 따라 변화하는 저항으로 모델링 되어있다[1]. 하지만 실제 무전극 램프는 저항 성분뿐만 아니라 인덕턴스 성분도 포함하고 있으며 여기에 관한 모델링이 확립되지 않은 상태이다. 본 논문에서는 램프전력에 따라 변화하는 저항과 인덕터로 구성된 무전극 램프 모델을 제안 하였다. 제안된 모델을 이용하여 램프의 조광 제어법을 해석하였다. 또한 이결과를 스위칭 주파수 가변조광제어와 DC-링크 전압 가변 조광제어에 적용하여 두방법의 특성을 비교함으로써 본 논문에서 제시된 모델링의 타당성을 입증하였다.

#### 2. 본 론

##### 2.1 램프모델

그림1은 무전극 램프 구조 및 발광원리를 나타낸다. 무전극 램프는 유도코일에 고주파의 고전압이 인가되어 자기장이 형성된다. 형성된 자기장으로 인해 램프내의 전자가 운동에너지를 얻어 수은 원자와 충돌함으로써 발광한다. 점등이 개시될 때까지 방전관은 페라이트 코어 때문에 인덕티브 부하로 취급되는 한편, 방전 후에는 램프전력에 따라서 변화하는 저항과 인덕터로 등가화 할 수 있다. 램프

전력이 큰 경우에는 램프의 저항성분이 주요 성분이 되고 램프전력이 작은 경우에는 인덕턴스 성분이 주요 성분이 된다. 기존 논문들에서는 램프를 전력에 따른 저항 성분으로만 등가화 하였는데 이는 조광제어를 하여 램프전력이 낮아지게 되면 일치하지 않는다[1]. 따라서 정확한 램프의 조광제어를 위해 저항과 인덕턴스 성분을 고려한 램프모델이 필요하게 된다.

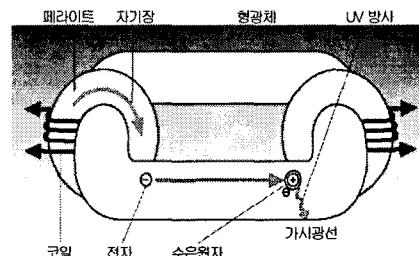


그림 1. 무전극 램프

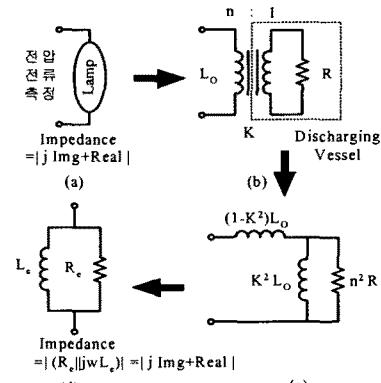


그림 2. 무전극 램프 등가화 모델

위의 그림2와 같이 무전극 램프모델은 램프의 전압과 전류를 측정하여 저항  $R_e$ 와 인덕터  $L_e$  모델로 등가화 시킬 수 있다. 램프 특성 실험으로부터 램프전력과 임피던스, 램프전력과 전압전류 위상차에서 일정한 관계식을 얻을 수 있다. 이를 이용하여 램프모델을 제안 하였다.

램프 특성을 나타낸 그림3으로부터 램프전력과 임피던스  $Z$ 는 1차식으로 근사화 할 수 있다.

$$Z = aP + b \quad (1)$$

램프 특성을 나타낸 그림4로부터 램프전력과 전압전류 위상차는 2차식으로 근사화 할 수 있다.

$$(\theta_V - \theta_I) = c \cdot P^2 + d \cdot P + e \quad (2)$$

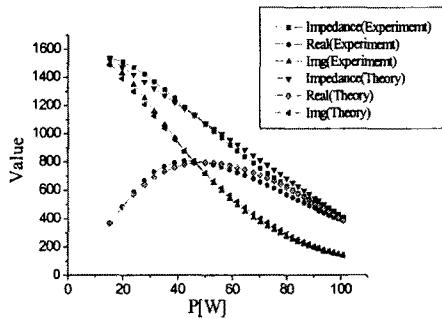


그림3. 램프전력과 임피던스, 임피던스의 실수부 (Real 임피던스의 허수부 (Img) 실험값과 이론값

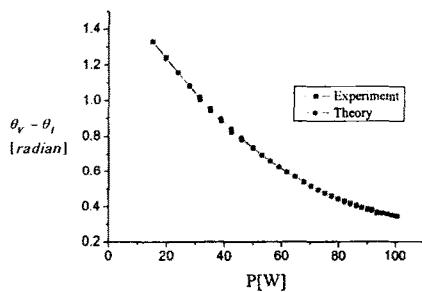


그림4. 램프전력과 전압, 전류 위상차 실험값과 이론값

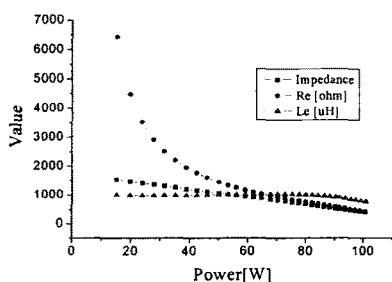


그림5. 램프전력과 등가 임피던스, 등가저항, 등가 인덕터

측정된 임피던스의 실수부  $Real$ 과 허수부  $Img$ 로부터  $R_e$ 와  $L_e$ 를 구할 수 있다. 결과는 식(3)과 같다. 이 식 (3)은 본 논문에서 제안된 램프 모델을 나타낸 식이다.

그림3은 램프전력에 대한 임피던스, 실수부  $Real$ , 허수부  $Img$  측정값과 식(3)을 통해 얻은 이론값을 나타낸다. 그림4는 램프전력에 대한 전압, 전류 위상차 측정값과 식(3)을 통해 얻은 이론값을 나타낸다. 그림5는  $Real$ 과  $Img$ 로부터 식(3)을 통해 구한 등가저항  $R_e$ 와 등가 인덕터  $L_e$ , 등가 임피던스  $Z$ 를 나타낸 그림이다. 또한 이는 본 논문에서 제안한 램프 모델을 나타낸다.

$$\begin{aligned} Real &= Z \cdot \cos(\theta_V - \theta_I) = (aP + b) \cdot \cos(c \cdot P^2 + d \cdot P + e) \\ img &= Z \cdot \sin(\theta_V - \theta_I) = (aP + b) \cdot \sin(c \cdot P^2 + d \cdot P + e) \\ a &= -13.14, b = 1732.43, c = 108.66 \times 10^{-6}, \\ d &= -240.75 \times 10^{-3}, e = 1.67 \end{aligned} \quad (3)$$

$$R_e = \left[ \left( \frac{img}{Real} \right)^2 + 1 \right] \times Real, \quad L_e = \frac{Real^2}{\omega \times img} \times \left[ \left( \frac{img}{Real} \right)^2 + 1 \right]$$

## 2.2 인버터

그림6은 전자식 안정기의 인버터 부분을 나타낸다. 위치  $S_1$ 과  $S_2$ 는 상호 교번으로 동작하고  $C_1$ 과  $C_2$ 는  $V_{DC}/2$ 을 유지할 만큼 충분히 큰 값을 사용하면 노드 X, Y 사이에 사각파를 인가하게 된다. 스위칭 주파수가 공진주파수와 비슷하면 램프양단에는 사인파가 인가되어 램프가 점등 된다[2][3].

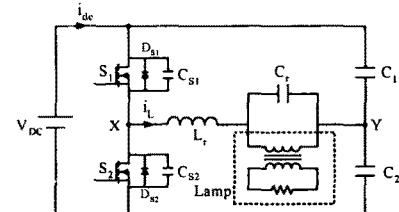


그림6. 전자식 안정기의 인버터 부분

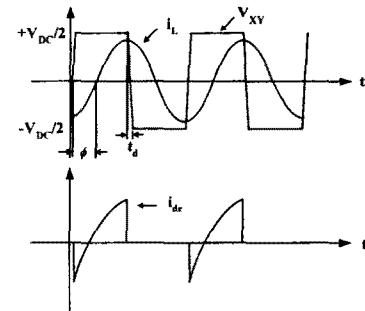


그림7.  $i_L$ 과  $i_{dc}$ 의 파형

스위칭 주파수가 공진 주파수 근처이므로 입력전원은 사인파로 동가화 할 수 있고 램프는 저항  $R_e$ 와 인덕터  $L_e$ 로 등가화 시키면 그림6으로부터 다음과 같이 인버터 등가회로를 나타낼 수 있다.

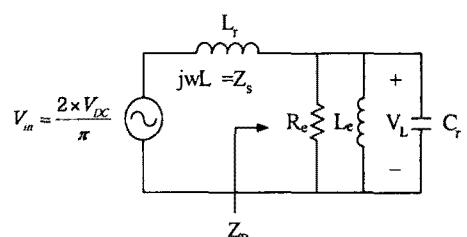


그림8. 인버터의 등가 회로

그림7로부터 인덕터 전류식을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$i_L(P, F, t) \equiv I_L(P, F) \sin(\omega t - \phi) \quad (4)$$

여기서  $I_L$ 과  $\Phi$ 는 다음과 같다.

$$I_L(P, F) = \frac{2V_{DC}}{\pi} \left| \frac{1}{Z_S(F) + Z_P(P, F)} \right| \quad (5)$$

$$\Phi = \arg [Z_S(F) + Z_P(P, F)]$$

그림8의  $Z_S(F)$ 는  $Z_S$ 가 주파수(F)의 함수임을 나타내고  $Z_P(P, F)$ 는  $Z_P$ 가 램프전력(P)과 주파수(F)의 함수임을 나타낸다.  $Z_P(P, F)$ 는 다음과 같다.

$$Z_P(P, F) = \frac{j\omega L_e \cdot R_e}{-\omega^2 L_e C_r R_e + j\omega L_e + R_e} \quad (6)$$

$Z_S(F)$ 는 다음과 같다.

$$Z_S(F) = j\omega L_r \quad (7)$$

입력 전류 평균값( $I_{dc}$ )은 인터터 전류( $i_L$ )를 적분함으로써 얻을 수 있다. 이는 다음과 같다.

$$I_{dc}(P, F) = \frac{1}{T} \int_0^T i_L(t) dt = \frac{I_L}{\pi} \cos \Phi \quad (8)$$

식(8)에 식(5)을 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{I_L}{\pi} \cos \Phi = \frac{2V_{DC}}{\pi^2} \times \frac{L_e \cdot R_e L_r}{[-\omega^2 L_r L_e]^2 + [-\omega^2 L_r L_e C_r R_e + L_e \cdot R_e + L_r R_e]^2} \quad (9)$$

그림8 으로부터 램프전압  $V_L$ 을 다음을 전개할 수 있다.

$$V_L(P) = \frac{\sqrt{2}V_{DC}}{\pi} \times \frac{1}{\sqrt{(-\omega^2 L_r C_r + 1 + \frac{L_r}{L_e})^2 + \left(\omega \frac{L_r}{R_e}\right)^2}} \quad (10)$$

식(10)을  $\omega$ 에 대하여 정리하여 전개하면 다음과 같다.

$$\omega = \sqrt{\frac{(-A) \pm \sqrt{(A)^2 - (4 \times L_r^2 C_r^2) \times \left(1 + \left(\frac{L_r}{L_e}\right)^2 + 2 \frac{L_r}{L_e} - \left(\frac{\sqrt{2}V_{DC}}{\pi \cdot V_L(P)}\right)^2\right)}}{2 \times L_r^2 C_r^2}} \quad (11)$$

여기서, A

$$A = -2 \times L_r C_r - 2 L_r C_r \frac{L_r}{L_e} + \left(\frac{L_r}{R_e}\right)^2 \quad (12)$$

이다. 식(3)과 식(11)을 이용해 스위칭 주파수( $\omega$ )와 램프전력(P)의 관계를 알 수 있다.

식(10)을  $V_{DC}$ 에 관해 정리한 후 식(9)에 대입하고  $P = V_{DC} \times I_{dc}$ 를 이용하면 다음을 나타낼 수 있다.

$$V_{DC} = P \times \frac{\pi}{\sqrt{2} \times \sqrt{PR_e}} \times R_e \times \sqrt{\left(-\omega^2 L_r C_r + 1 + \frac{L_r}{L_e}\right)^2 + \left(\omega \frac{L_r}{R_e}\right)^2} \quad (13)$$

식(3), 식(13)을 이용해  $V_{DC}$ 와 P의 관계를 알 수 있다.

그림9는 식(11)을 이용하여 주파수 와 램프전력을 나타낸 그림이다. 그림10은 식(13)을 이용하여  $V_{DC}$ (DC링크전압)와 램프전력을 나타낸 그림이다. 시뮬레이션 조건은 실험조건과 동일하고 이는 표[1]에 나타나 있다. 이상의 결과로부터 주파수 가변의 경우 램프전력이 작아

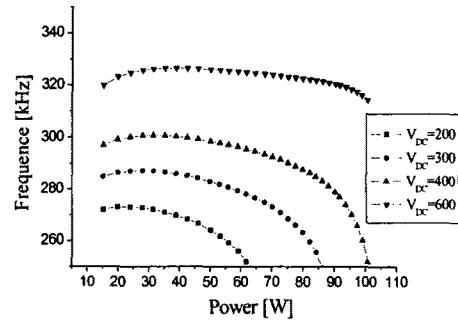


그림9. 램프전력과 주파수의 관계

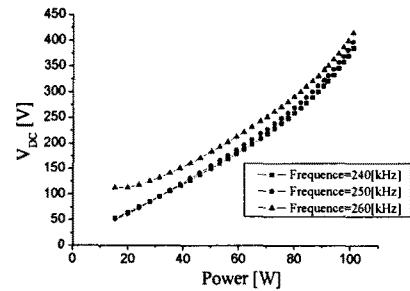


그림10. 램프전력과  $V_{DC}$ 의 관계

지면 주파수를 조금만 변화 시켜도 램프전력이 급변함을 알 수 있다. 이에 비해 DC링크전압 가변의 경우  $V_{DC}$ 와 램프전력이 상당한 선형성을 유지함을 알 수 있다.

### 2.3 실험

제안된 모델링 해석을 근거로 무전극 램프용 공진형 인버터를 제작 실험을 실시하였다. 인버터에 적용된 주요 회로 정수 값은 다음과 같다.

표[1] 무전극 램프용 인버터의 회로정수

	DC전압 가변	주파수 가변
$L_r$	236[uH]	230[uH]
$C_r$	2.2[nF]/1[kV]	1.76[nF]/1[kV]
$C_1, C_2$	10[uF]/400[V]	10[uF]/400[V]
$V_{DC}$	80~400[V]	400[V]
스위칭 주파수	250[kHz]	250~330[kHz]
공진주파수	220[kHz]	250[kHz]
실험 램프	오스람사의 ENDURA 100[W]/840	

그림11은 주파수와 램프전력의 관계를 이론값과 실험값을 비교한 것이다. 그림12는  $V_{DC}$ 와 램프전력의 관계를 이론값과 실험값을 비교한 것이다. 실험결과 이론값과 실험값이 비슷함을 알 수 있고 이는 제안된 램프의 모델과 조광제어 이론의 타당성을 입증한다.

그림13은 DC전압 가변의 조광제어 램프를 나타낸다. 그림으로부터 조광제어가 잘 됨을 알 수 있다.

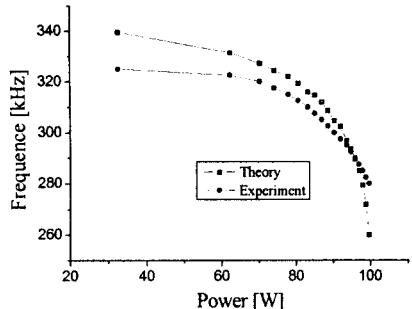


그림11. 주파수 가변 실험값과 이론값 비교

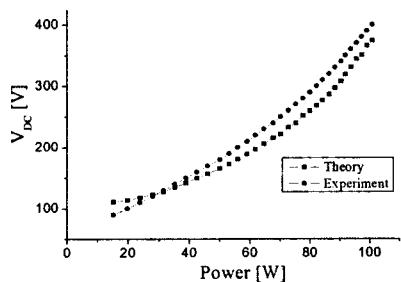


그림12. DC링크전압 가변 실험과 이론 비교

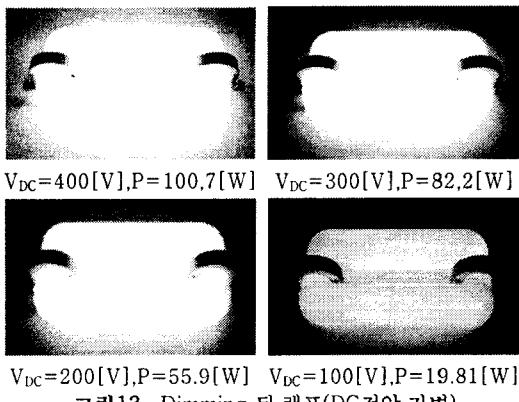


그림13. Dimming 된 램프(DC전압 가변)

## 2.4 실험 파형

그림14는 DC전압 가변 실험에서  $V_{DC}=400[V]$  일때 전압과 전류 파형을 나타낸다. 이때 램프전력은 100.7[W]이고 전압과 전류의 위상차는 19.9°이다. 그림15는 DC전압 가변 실험에서  $V_{DC}=100[V]$  일때 전압과 전류 파형을 나타낸다. 이때 램프전력은 19.81[W]이고 전압과 전류의 위상차는 76.2°이다. 이상으로부터 램프의 부저항 특성을 알 수 있다. 또한 램프전력이 큰 경우에는 전압과 전류의 위상차가 적어 저항성분이 주요 성분임을 알 수 있고 램프전력이

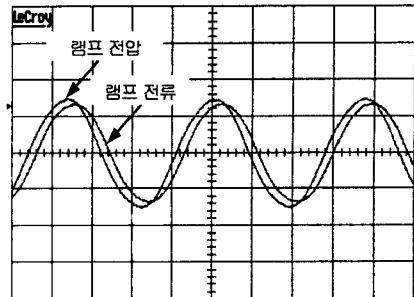


그림 14. 전압[200/div] 램프 전류[0.5A div]

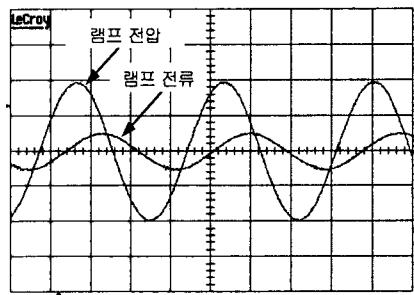


그림 15. 전압[200/div] 램프 전류[0.5A div]

작은 경우 램프의 전압과 전류의 위상차가 커져 인덕턴스 성분 주요 성분임을 알 수 있다.

## 3. 결 론

조광제어를 위한 무전극 램프 모델을 제안 하였다. 이 모델을 적용하여 주파수 가변 조광제어와 DC 링크 전압 가변 조광제어에 대한 비교 연구결과를 제시하였다. 조광제어에 있어서 주파수 가변제어의 경우 램프전력이 낮아질수록 주파수의 변화에 대하여 램프전력이 급격히 변화함으로써 쉽지 않은 제어 메카니즘을 요구한다. 뿐만 아니라 스위칭 주파수의 가변은 EMI필터 설계를 어렵게 한다. 반면 DC 링크 전압 가변 제어의 경우 DC전압에 대한 램프전력의 변화가 거의 선형에 근접하여 제어도가 우수하다. 하지만 조광제어를 위한 DC 링크 전압 범위가 넓다는 단점을 가지고 있음을 밝혔다.

## [참 고 문 헌]

- [1] Hiroshi Kido, Shinji Makimura, Shingo Masumoto "A Study of Electronic Ballast for Electrodeless Fluorescent Lamps with Dimming Capabilities" IEEE, pp.889~894, 2001
- [2] T. F. Wu, J. C. Hung, and T. H. Yu, "A PSPICE circuit model for low pressure gaseous discharge lamps operating at high frequency," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 44, pp. 428~431, May 1997.
- [3] S. Y. R. Hui and H. Chung, "Dimming control of el-electronic ballasts with low EMI and low switching stress by varying DC converter voltage," U.S. patent pending, May 1998.