

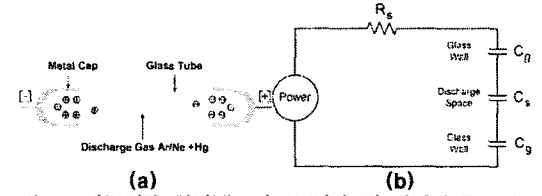
외부전극 형광램프의 해석모델과 구동 특성

김철진\*, 홍성호\*, 유병규\*, 신흥교\*\*  
 한라대학교\*, 경상대학교\*\*

A Study on the Impedance Model and Driving Performance for the Electrodeless Fluorescent Lamp

Cheri-Jin Kim\*, Sung-Ho Hong\*, Byeong-Kyu Yoo\*, Heung-Kyo Shin\*\*  
 Halla Univ\*, GyeongSang National Univ\*\*

**Abstract** - A impedance model simulating the electrical characteristics of the Electrodeless fluorescent lamp operated at high frequency is proposed. The model is constructed from a two parameter equation which is derived based on a set of two measurements. This is a readily constructed and computer simulator oriented model which is suitable for a preliminary design of electronic ballasts. Simulated and experimental results are used to verify the analytical discussions, and, moreover, an electronic ballast design example using the proposed model is presented to further demonstrate its applications.



<그림 1> 외부전극 형광램프의 구조(a) 및 전기적 등가회로(b)

$C_g$ 와  $C_s$ 의 커패시턴스 성분은 일반적으로 전극이 내부에 있는 방전형태와 다르게 유리가 유전층으로 작용하게 되고 교류형태의 전원이 인가되면 유리관에 전하가 축적되고 다른 극이 인가되면 축적된 전하가 다른 극의 방전시 발생하는 전자와 합쳐 높은 효율을 나타내게 된다.

1. 서 론

최근, 고효율, 고연색성, 장수명의 특징으로 일반 조명용 외에 디스플레이 장치의 광원 등 정보화산업과 연관되어 적용이 모색되고 있는 외부전극 형광램프의 개발 및 구동방안에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 외부전극 형광램프(EEFL)는 기존의 내부전극으로 열전자를 방출하여 형광체를 발광하는 형광램프와는 달리 방전관 양끝 외부에 결합된 유도성(자계방전) 코일 또는 용량성(전계방전) 메탈 cap에 고주파의 강한 자계 또는 전계를 발생시켜 방전하는 원리를 갖는다. 내부에 전극이 없으므로 흑화현상으로 인한 수명단축을 제거할 수 있으며, 전극의 예열이 필요 없기 때문에 즉각적인 구동 및 재구동의 장점과 빠른 응답성을 갖는다.

또한, 램프의 변형이 용이하여 직관형, 전구형, 환형 등 다양한 형상의 램프가 개발되고 있다. 진공봉합(Sealing)의 신뢰성이 높기 때문에 램프간의 전압편차가 적고 휘도유지 특성이 우수하여 단일 인버터로 다수개의 병렬구동이 가능하다.

외부전극 형광램프를 점등하기 위해서는 고주파의 안정기가 필요하며, 최적의 안정기 설계를 위해서는 램프의 임피던스 특성이 정확히 이해되어야 한다. 기존의 안정기 회로의 개발에 있어서 안정기 회로의 시뮬레이션은 램프를 하나의 고정된 저항으로 간주하였다. 그러나 램프전류의 증가와 함께 저항은 감소하기 때문에 고정된 저항 모델은 단지 하나의 동작 점에 대해서만 타당하다. 따라서 램프전력에 따른 평균램프전력에 대한 램프의 임피던스 모델이 필요하다.

본 연구에서는 회로의 시뮬레이션에 적용 가능한 전계방전특성을 갖는 외부전극 형광램프의 임피던스 모델에 대한 연구를 진행하였다. 고주파에서 구동되는 외부전극 형광램프의 중요한 전기적 특성으로, 일정전력으로 구동되는 램프 부하의 특성과 전기적 여기상태에서의 과도응답 특성을 들 수 있으며, 이를 표현할 수 있는 임피던스 모델을 개발하는데 본 연구의 목적을 두고 있다.

실험에 의한 관측으로부터 물리적 이론에 근거하여, 외부전극 형광램프의 전기적 응답을 예측할 수 있는 동작 모델을 제시하였으며, 확립된 임피던스 모델로부터 고효율 동작이 가능한 비대칭 Harf-bridge 인버터의 설계과정을 제시하였다.

2. 본 론

2.1 외부전극 형광램프의 방전특성

그림 1의 (a)는 본 연구에서 적용한 외부전극 형광램프의 구조를 나타내고 있다. 램프의 형태는 일반 용량성 램프와 동일하다. 직관형 램프의 방전관 외부 양단에 Cu, Ni, Fe 등의 도전성 물질을 입혀 전극을 존재시키고 수십[kHz]-수백[kHz]의 고주파의 전압을 인가하여 점등되며, 인가한 전압에 의한 전하발생과 더불어 전극안쪽에 위치한 유리가 유전층으로 작용하여 유리관에 쌓인 전하 즉, 변위전류(Displacement Current)가 방전에 도움을 주어 전류이득을 꾀하는 효과가 있다. 램프 내부에서 일어나는 가스방전현상은 일반 형광램프와 동일하다.

그림 1의 (b)는 용량성 교류방전램프의 유리관에 의한 전하축적과 관련된 전기적 등가회로이다.  $C_g$ 는 유리관과 전극사이에 생긴 커패시턴스이고,  $C_s$ 는 방전공간에 생긴 커패시턴스이다.

2.2 외부전극 형광램프의 임피던스 모델 유도

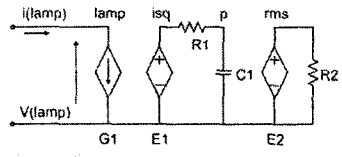
본 연구에서 확립한 임피던스 모델은 외부전극 형광램프가 열전극을 갖는 형광램프와 유사한 특성을 갖는다는 기본적인 가정을 둔다. 두 램프간의 유일한 차이점은 전극을 갖는 램프는 전기 에너지가 도체를 통하여 전달되지만, 외부전극 형광램프는 전기적 에너지가 플라즈마와 결합된다는 사실이다. 따라서 이러한 가정은 타당하다.

고주파에서 동작되는 형광램프의 임피던스는 1차 근사로 저항성이라 할 수 있다.[1] 즉, 임의의 동작점에서 램프 아크튜브의 전류는 다음 식 (1)로 표현될 수 있다.

$$I_{lamp} = \frac{V_{lamp}}{R_{eq}} \tag{1}$$

여기서,  $I_{lamp}$  : 램프전류  
 $V_{lamp}$  : 램프전압  
 $R_{eq}$  : 고주파 구동시 램프의 등가저항

등가저항  $R_{eq}$ 는 램프의 실효치 전류를 적용한 동작 점의 함수이다. 전 동작영역에서 램프에 대한 실효치 전류와 전압을 측정함으로써 쉽게 구할 수 있다.



<그림 2> 제안된 형광램프 모델

$G_1$  함수는 임의의 동작점에서 램프양단의 전압을  $R_{eq}$ 로 나눈 값으로 램프의 실효치 전류의 함수로 표현한 것이다. 여기서, 종속전압원  $E_1$ 의 출력은 램프전류  $i_{(lamp)}$ 의 제곱에 비례한다.

$$G_1 = \frac{V_{lamp}}{R_{eq}(i_{rms})} \tag{2}$$

$$E_1 \equiv \{i_{(lamp)}\}^2 \tag{3}$$

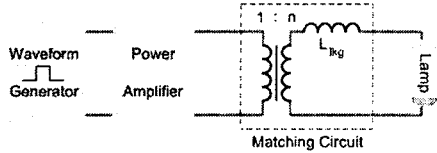
노드 ( $i_{sq}$ )에서의 전압신호  $V(i_{sq})$ 는 저주파성분을 구하기 위해, 저역통과 필터 ( $R_1, C_1$ )를 경유하게 된다. 주파수  $f = 1/2\pi\sqrt{R_1 C_1}$ 와 시간  $t > R_1 C_1$ 에서  $C_1$ (노드(p))의 평균전압은 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$V_{(P)} = \frac{1}{T} \int_0^T V(i_{sq}) dt \equiv \frac{1}{T} \int_0^T [i_{(lamp)}]^2 dt \quad (4)$$

여파된 실효전류  $I_{rms}$ 는 커패시터  $C_1$ (노드(p)) 양단의 평균전압의 제곱근으로 표현되는  $E_2$ 에 의해서 구할 수 있다.

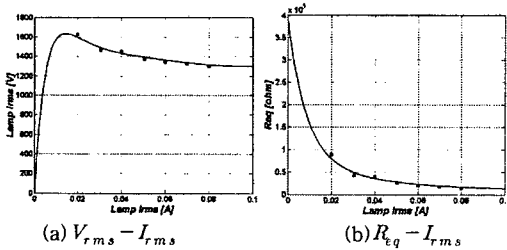
$$E_2 \equiv \sqrt{V(P)} \quad (5)$$

따라서, 노드 rms에서의 전압,  $V_{(rms)}$ 는 램프의 실효치 전류와 같은 값이 되며, 이 전압은 식(1)에서 램프전류를 계산하기 위한  $R_{eq}(V_{(rms)})$ 로 사용된다.



〈그림 3〉 외부전극 형광램프의 측정회로

그림 3은 본 연구에서 램프의  $V_{rms} - I_{rms}$  특성을 측정하기 위한 측정회로를 나타내고 있으며, 파형발생기, 전력 증폭기, 임피던스 매칭회로, 램프로 구성되어 있다. 파형발생기는 고주파 구형파 신호를 발생하기 위해서 조절되고, 발생된 신호는 매칭회로를 경유하여 램프를 구동하기 위해서 전력증폭기에 의해 증폭된다. 파형의 증폭조절은 램프의 전압과 전류를 조절하게 된다. 본 연구에서 사용한 직관형 77[W] 외부전극 형광램프의  $V_{rms} - I_{rms}$  특성 곡선은 그림 5에 나타내었다.



〈그림 4〉 측정을 통한 외부전극 형광램프의 특성곡선

함수  $R_{eq}(V_{(rms)})$ 는 램프전류의 함수로 표현되는  $R_{eq}$ 로 대체할 수 있다. 본 연구에서 적용한 직관형 77[W] 램프에 대한 모델의 파라미터는 실험을 통해서 설정하였다. 램프의 등가저항  $R_{eq}$ 는 20[mA]에서 55[mA]까지의 램프전류범위에서 전압과 전류를 측정하여 구하였으며, 결과를 그림 3에 나타내었다.  $R_{eq}$ 와 램프의 실효치 전류 사이의 함수관계를 결정하기 위하여 지수근사방법을 적용하였으며, 램프의 등가저항에 대한 수식적 표현은 식(8)과 같다.

$$R_{eq} = A_0 + A_1 \times \text{EXP}(A_3 \times I_{rms}) + A_3 \times \text{EXP}(A_4 \times I_{rms}) \quad (6)$$

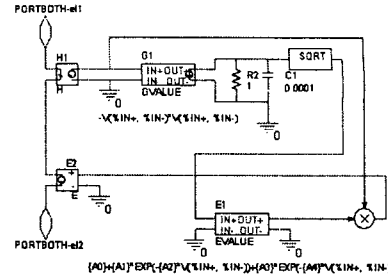
식(8)의 파라미터  $A_0 - A_4$ 는 표 1에 제시하였다.

〈표 1〉 방정식 (8)의 모델 파라미터

Parameter	Value
$A_0$	8550
$A_1$	79000
$A_2$	28.7
$A_3$	310000
$A_4$	120

본 연구에서는 직관형 77[W] 외부전극 형광램프의 PSpice 시뮬레이션 설정하기 위해 증속전류원  $G_1$  및 그림 3의 모델 당 추가 전원  $H_1 - E_2$ 으로 대체하여 나타내었다.

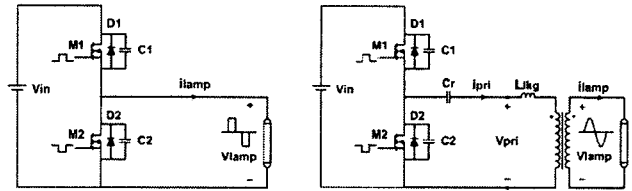
그림 5의 외부전극 형광램프 PSpice 모델 회로에서,  $H_1$ 은 램프순시전류를 검출하기 위한 이득 1을 갖는 전류제어 전압원이며,  $G_1$ 은 제곱함수 전압제어 전류원이다.  $E_1$ 는 식 (6)을 나타낸 전압제어 전압원이며,  $E_2$ 는 램프순시전압을 발생하기 위한 이득 1을 갖는 전압제어 전압원이다.



〈그림 5〉 외부전극 형광램프의 PSpice 모델

## 2.4 외부전극 형광램프의 구동 인버터

용량성 전계방전특성을 갖는 외부전극 형광램프의 구동은 정현파 구동방식과 구형파 구동방식으로 분류할 수 있다. 그림 6은 외부전극 형광램프의 구동을 위해서 적용한 비대칭 Half-bridge 인버터의 구형파 구동 및 정현파 구동 방식의 회로구조를 나타내고 있다.



(a) 구형파 구동 (b) 정현파 구동  
〈그림 6〉 외부전극 형광램프의 구동방식

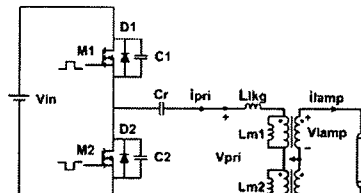
구형파 구동방식은 스위치 M1, M2의 교번 동작으로 인하여 전원의 전력이 구형파형태로 램프에 공급되게 된다. 램프 앞단에 트랜스포머를 사용하지 않기 때문에 트랜스포머에서 발생하는 전력손실을 제거할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 램프를 구동하기 위한 구형파의 고전압이 램프에 양단에 직접적으로 가해지므로 펄스형태의 전류에 의한 스트레스로 인하여 전력손실이 발생하게 된다.

정현파 구동방식은 트랜스포머를 사용하여, 고전압이 트랜스의 턴-비에 의해서 트랜스의 2차측에 공급된다. 트랜스포머의 사용으로 정현파구동방식의 주요 전력 손실은 트랜스포머에서 발생하게 된다. 따라서 최대전력이 램프에 전달 될 수 있도록 트랜스포머의 입력력 간에 임피던스 매칭요소가 적용되어야 한다.

본 연구에서는 외부전극 형광램프를 구동하기 위해서 정현파 구동방식을 채택하였고 유도된 임피던스 모델은 광출력과 전력소비비를 조절하기 위한 조광제어에 적합하며, 비대칭 Half-bridge 인버터의 설계에 적용하였다.

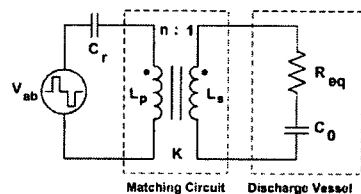
## 2.4 외부전극 형광램프의 구동 인버터 해석

그림 7은 실험에 사용된 정현파 구동방식 비대칭 Half-bridge 인버터의 기본회로를 나타내고 있다. 적절한 출력전력을 얻기 위해 두 개의 동일한 트랜스포머를 직렬로 연결하였다.

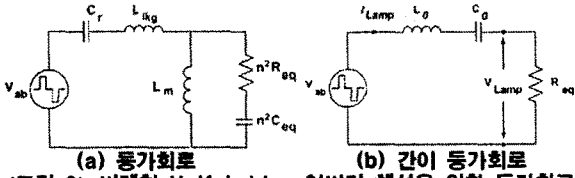


〈그림 7〉 비대칭 Half-bridge 인버터 기본회로

그림 7의 비대칭 Half-bridge 인버터의 간략화된 모델은 그림 8에 나타내었다. 임피던스 매칭 회로와 램프의 전기적 모델이 결합된 형태로 트랜스의 누설인덕턴스와 램프의 커패시턴스 성분이 직렬공진을 일으켜 램프에 정현파의 고전압을 공급하게 된다. 따라서, 임피던스 매칭특성과 직렬공진 특성의 해석이 각각 이루어져야 한다.



〈그림 8〉 비대칭 Half-bridge 인버터 간략화된 모델



(a) 동가회로 (b) 간이 동가회로  
**<그림 9> 비대칭 Half-bridge 인버터 해석을 위한 동가회로**

그림 9는 임피던스 매칭 회로 및 직렬공진특성을 해석하기 위한 비대칭 Half-bridge 인버터의 동가회로이다. 그림 9 (a)의 회로 파라미터는 다음 식과 같다.

$$\text{상호인덕턴스 : } M = \frac{L_0^+ - L_0^-}{4} \quad \text{결합계수 : } k = \frac{M}{\sqrt{L_p L_s}}$$

$$\text{누설인덕턴스 : } L_{kg} = L_p(1 - k^2) \quad \text{턴-비 : } a = \frac{L_s}{M}$$

그림 9의 (b)에서  $L_0 - C_0$  탱크는 구형과전압원에 의해서 구동된다. 외부전극 형광램프의 임피던스 모델은 램프 전력의 변화에 따라서 즉, 실효치 전압 및 전류의 변화에 의하여 계산되는 저항성분으로 간주되고  $L_0 - C_0$  성분값은 다음 분석으로부터 쉽게 결정될 수 있다. 정상상태에서, 그림 9의 (b)에 나타낸 간이동가회로의 입력력전압이득은 식 (7)로 나타낼 수 있다.

$$G(j\omega) = \left| \frac{V_0(j\omega)}{V_{ab}(j\omega)} \right| = \frac{1}{\sqrt{1 + Q_0^2 \left( \frac{\omega}{\omega_r} - \frac{\omega_r}{\omega} \right)^2}} \quad (7)$$

정상상태해석을 위한 회로 파라미터는 다음 식과 같다.

$$\text{공진 주파수 : } \omega_r = \frac{1}{\sqrt{L_0 \cdot C_0}} \quad (8)$$

$$\text{부하 첨예도 : } Q_0 = \frac{\omega_r L_0}{R_{Lamp}} = \frac{1}{\omega_r R_{Lamp} C_0} = \frac{\sqrt{L/C}}{R_{Lamp}} \quad (9)$$

그림 5로부터 만약 램프저항  $R_{Lamp}$ 가 식(8)의 등가저항  $R_{eq}$ 로 표준화되고  $V_{Lamp}$ 가 최대정격전압  $V_{max}$ 로 표준화된다면 임의의 동작점 (n)에서의 램프저항은 다음 식(10)으로 표현할 수 있다.

$$R_{Lamp(n)} = \frac{V_{Lamp(n)}}{V_{max(n)} - V_{Lamp(n)}} \quad (10)$$

$$\text{여기서, } R_{Lamp(n)} = \frac{R_{Lamp}}{|R_{eq}|}, \quad V_{Lamp(n)} = \left| \frac{V_{Lamp}(j\omega)}{V_S(j\omega)} \right|, \quad V_{max(n)} = \left| \frac{V_{max}}{V_S(j\omega)} \right|$$

식 (13)과 (17)로부터, 출력전압은 다음 식 (11)로 나타낼 수 있다.

$$V_0(n) = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega(n) - 1/\omega(n))^2 \cdot Z_0(n) \left[ \frac{V_{max(n)} - V_{Lamp(n)}}{V_{Lamp(n)}} \right]^2}} \quad (11)$$

$$\text{여기서, } \omega(n) = \frac{\omega}{\omega_r}, \quad Z_0(n) = \frac{\sqrt{L/C}}{|R_{eq}|}$$

출력전류는 식 (12)와 같다.

$$I_{Lamp(n)} = \frac{I_{Lamp} |R_{eq}|}{V_{max}} = \frac{V_{Lamp} |R_{eq}|}{R_{Lamp} V_{max}} = \frac{V_{Lamp(n)}}{R_{Lamp(n)}} \quad (12)$$

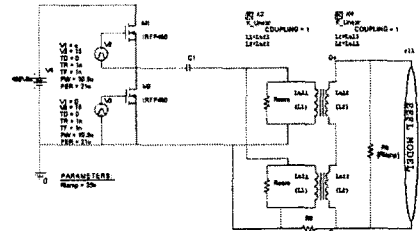
### 2.2.1 실험결과 및 고찰

본 연구에서 확립한 외부전극 형광램프의 임피던스 모델과 설계 과정의 타당성을 확인하기 표 2의 파라미터의 설계조건을 통하여 시뮬레이션 및 실험을 수행 하였다.

**<표 2> 회로 파라미터**

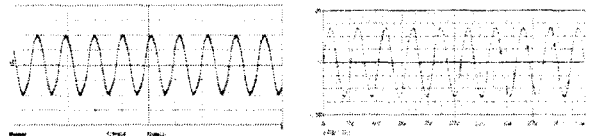
$V_{rms} = 1.385 [kV]$	$V_{in} = 400 V_{(S)}$
$I_{rms} = 55.6 [mA]$	$\omega_r = 47 [kHz]$
$R_{Lamp} = 24.9 [k\Omega]$	$P_{out} = 77 [W]$

표 2의 회로 파라미터로부터 L과 C는 각각  $L = 12.8mH$   $C = 946.5nF$ 으로 결정될 수 있었으며, 그림 10에 시뮬레이션에 사용된 모델을 제시하였다.

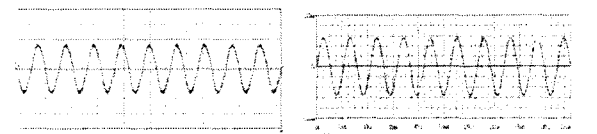


**<그림 10> 외부전극 형광램프의 시뮬레이션 모델**

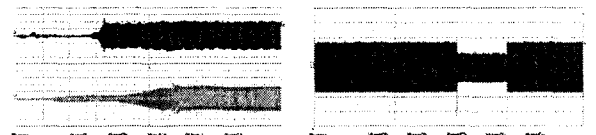
정상상태 실험결과와 모델 시뮬레이션결과 사이의 일치 정도는 그림 11, 12의 시간영역 신호와 그림 4의 정상상태  $V_{rms} - I_{rms}$  곡선으로부터 알 수 있다.



(a) 실험 파형 [1kV/div] (b) 시뮬레이션파형 [1kV/div]  
**<그림 11> 정상상태시 실효치 전압파형**



(a) 실험 파형 [20mA/div] (b) 시뮬레이션파형 [20mA/div]  
**<그림 12> 정상상태시 실효치 전류파형**



(a) 기동시 [1kV/div] (b) 50%부하변동파형 [1kV/div]  
**<그림 13> 과도상태시 전압 측정파형**

## 3. 결 론

회로의 시뮬레이션이 회로설계의 예비단계에서 중요한 역할을 차지하고 있다. 부하특성에 적합한 임피던스 모델 없이는 어떠한 회로 시뮬레이션 패키지라도 효과가 없다. 본 연구에서는 외부전극 형광램프의 임피던스 모델을 제안하였다. 전기적 안정화를 수반할 때, Lamp의 정상상태특성 분석을 위해서 유용하다. 제안된 모델로부터 안정기의 설계과정의 타당성은 시뮬레이션과 실험을 통하여 입증하였다. 결과적으로 상호 일치함을 알 수 있다.

제안된 모델은 외부전극 형광램프의 정상상태특성을 이해하기 위해서 적합하며, 실질적으로, 초기 과도특성은 광특성과 램프수명에 많은 영향을 줄 것이다. 따라서, 향후, 램프전류의 단계적 변화에 따른 램프전압의 과도특성을 관측함으로써 시뮬레이션 모델을 확장할 필요가 있다.

### 감사의 글

본 연구는 산업자원부의 대학전력연구센터 육성지원사업 (1-2004-0-074-0-00)에 의하여 수행된 과제입니다.

### [참 고 문 헌]

- [1] S. Ben-Yaakov, M. Sbvartsas, and S. Gluzman, "Static and dynamic of fluorescent lamps operating at high frequency Modeling and simulation", IEEE Applied Power Electronics Conference, APEC-99, pp. 467-472, 1999
- [2] M. C. Cosby Jr and R. M. Nelms, "A resonant inverter for electronic ballast and application", IEEE Trans. Ind. Electron, vol. 41, pp. 418-425, Aug. 1994
- [3] M. Gulco and S. Ben-Yaakov, "Current-sourcing parallel-resonance inverter (CS-PPRI) : Theory and application as a fluorescent lamp driver", IEEE Applied Power Electronics Conference, APEC-93, pp. 4111-4117, San-Diego, 1993
- [4] S. Gluzman and S. Ben-Yaakov, "Dynamic interaction of high frequency electronic ballasts and fluorescent", IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 37, pp. 1531-1536, 2001.