2006년도 대한전기학회 EMECS학회 추계학술대회 논문집 (2006.10.19-10.21)

전계 방전형 외부전극 형광램프의 등가모델과 인버터 구동

김 철 진*, 유 병 규**°, 신 흥 교***
한라대학교*, (주)디지아이**, 경상대학교***

The Impedance Model and Inverter Driving for the External-Electrode Fluorescent Lamp

Cherl-Jin Kim*, Byeong-Kyu Yoo**°, Heung-Kyo Shin***
Halla Univ*, DGI**, 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 ist applications.

1. 서 론

고효율, 고연색성, 장수명의 특징을 갖는 외부전극 형광램프(EEFL, External Electrode Fluorescent Lamp)는 기존의 내부전극으로 열전자를 방출하여 형광체를 발광하는 형광램프와는 달리 방전관 양끝 외부에 결합된 용량성(전계 방전) 메탈 캡(cap)에 고주파의 강한 자계 또는 전계를 발생시켜 방전하는 원리를 갖는다. 내부에 전극이 없으므로 흑화현상으로 인한 수명단축을 제거 할 수 있으며, 전극의 예열이 필요 없기 때문에 즉각적인 구동 및 재구동의 장점과 빠른 응답성을 갖는다.

외부전극 형광램프는 일찍이 외부전극을 갖는 램프와 같은 플라즈마 방전 실험으로부터 확인된 바와 같이 장수명의 관점에서 개발되었다.[1][2] 최근에는 100[kHz]이하의 구동주파수에서 작은 관직경을 갖는 외부전극 형광램프의 고휘도 특성에 관한 연구가 이루어지고 있다.[3][4] 특히, 진공봉합(sealing)의 신뢰성이 향상되어 왔기 때문에 램프간의 전압편차가 적고 휘도유지 특성이 우수하여 단일 인버터로 다수개의 병렬구동이 가능하게 되었다.[5] 그리고 다양한 램프의 가공이 가능하여 직관형, 전구형, 환형 등 각종 형상의 램프가 개발되고 있다.

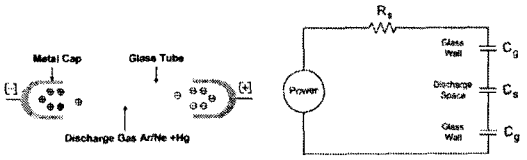
외부전극 형광램프를 점등하기 위해서는 고주파의 안정기가 필요하며, 기존에는 안정기 회로의 개발에 있어서 램프 부하를 정상상태시 하나의 고정된 저항으로 간주하여 시뮬레이션 및 설계가 이루어져 왔다.

그러나 램프전류의 증가와 함께 저항이 감소하기 때문에 고정된 저항 모델은 단지 하나의 동작 점에 대해서만 타당하다. 따라서 최적의 안정기 설계를 위해서는 램프의 임피던스 특성이 정확히 이해되어야 하며, 변화하는 램프전력에 따른 평균램프전력에 대한 램프의 임피던스 모델을 확립하여 안정기를 설계하는 것이 필요하다.

본 연구에서서는 회로의 시뮬레이션에 적용 가능한 전계 방전형 외부전극 형광램프를 대상으로 실험에 의한 관측으로부터 물리적 이론에 근거하여 전기적 응답을 예측할 수 있는 등가모델을 제시하였으며, 고효율 동작이 가능한 비대칭 하프브리지(Half-bridge) 인버터의 구동특성에 대한 연구를 진행하였다.

2. 외부전극 형광램프의 임피던스특성

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, Fe등의 도전성 물질을 입혀 전극을 존재시키고 수십[kHz]-수백[kHz]의 고주파의 전압을 인가하여 점등되며, 인가한 전압에 의한 전하발생과 더불어 전극 안쪽에 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.



(a) (b)

그림 1. 외부전극 형광램프의 구조(a) 및 전기적 등가회로(b)

그림 1의 (b)는 용량성 교류방전램프의 유리관에 의한 전하축적과 관련된 전기적 등가회로이다. C_g는 유리관과 전극사이에 생긴 커패시턴스이고, C_s는 방전공간에 생긴 커패시턴스이다. C_g와 C_s의 커패시턴스 성분은 일반적으로 전극이 내부에 있는 방전형태와 다르게 유리가 유전층으로 작용하여 교류형태의 전원이 인가되면 유리관에 전하가 축적되고 다른 극이 인가되면 축적된 전하가 다른 극의 방전시 발생되는 전자와 합쳐 높은 효율을 나타내게 되며 단일 인버터로 램프의 병렬구동이 가능하다.

3. 외부전극 형광램프의 등가모델

본 연구에서 외부전극 형광램프의 등가모델을 수립하기 위해 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 전기에너지가 플라즈마와 결합된다는 사실이다. 따라서 이러한 가정은 타당하다.

고주파에서 동작되는 형광램프의 임피던스는 1차 근사로 저항성이라 할 수 있다.[2] 즉, 임의의 동작점에서 램프 아크튜브의 전류는 다음 식(1)로 표현 될 수 있다.

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

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

그러나, 여기서 등가저항 R_{eq}는 램프의 실효치 전류를 적용한 동작점의 함수로 표현된다. 이 의존성은 전 동작 영역에서 램프에 대한 실효치 전류와 전압을 측정함으로써 쉽게 구할 수 있다.

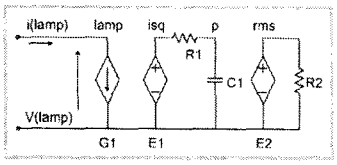


그림 2. 기존 형광램프의 등가모델

G_1 함수는 임의의 동작점에서 램프양단의 전압을 R_{eq}로 나눈 값으로 램프의 실효치 전류의 함수로 표현한 것이다. 여기서, 종속전압원 E_1의 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)을 경유하게 된다. 주파수 $f = 1/2\pi\sqrt{R_1C_1}$와 시간 $t > R_1C_1$에서 C_1(노드(p))의 평균전압은 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

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

여과된 실효전류 I_{rms}는 커패시터 C_1(노드(p)) 양단의 평균전압의 제곱근으로 표현되는 E_2에 의해서 구할 수 있다.

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

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 3은 본 연구에서 램프의 $V_{rms}-I_{rms}$특성을 측정하기 위한 측정회로를 나타내고 있으며, 파형발생기, 전력증폭기 임피던스 매칭회로 램프로 구성하였다.

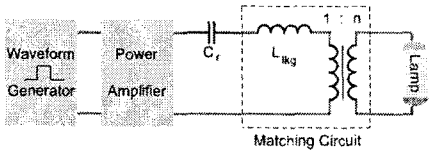


그림 3. 외부전극 형광램프의 측정회로

본 연구에서는 10개의 직관형 외부전극 형광램프를 병렬로 구성하여 60[W]의 정격에서 실험을 수행하였으며, 측정 데이터는 표 1에 제시하였다.

표. 1 외부전극 형광램프의 측정데이터

램프 수	$V_{rms}[kV]$	$I_{rms}[mA]$	Power[W]	P.F
10	1.2496	104.5	59.02	0.452
8	1.2647	100.77	55.06	0.432
6	1.2830	97.24	51.03	0.409
4	1.2978	93.47	46.58	0.384
2	1.3140	89.92	42.77	0.362

본 연구에서 적용한 직관형 60[W] 외부전극 형광램프에 대한 모델의 파라미터는 실험을 통해서 89.92[mA]에서 104.5[mA]까지의 램프전류 범위에서 전압과 전류를 측정하여 설정하였으며, 램프의 등가모델은 그림 4에 제시하였다.

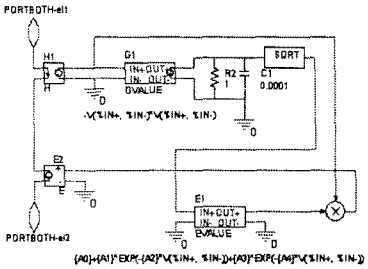


그림 4. 외부전극 형광램프의 등가모델

4. 외부전극 형광램프의 인버터구동

그림 5는 실험에 사용된 정현파 구동방식 비대칭 하프브리지 인버터의 기본회로를 나타내고 있다. 적절한 출력전력을 얻기 위해 두 개의 동일한 트랜스포머를 연결하였다.

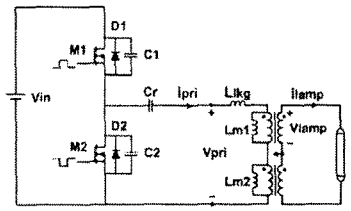


그림 5. 비대칭 하프브리지 인버터 기본회로

그림 5 비대칭 하프브리지 인버터의 C_2의 값이 작아서 입력임피던스에 영향을 미치지 않는다고 가정하면 그림 6의 간략화 된 모델로 나타낼 수 있다. 임피던스 매칭회로와 램프의 전기적 모델이 결합된 형태로 트랜스의 누설인덕턴스와 램프의 커패시턴스 성분이 직렬공진을 일으켜 램프에 정현파의 고전압을 공급하게 된다. 그림 7은 직렬공진특성을 해석하기 위한 비대칭 하프브리지의 등가회로이다.

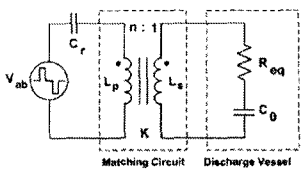


그림 6. 비대칭 하프브리지 인버터 등가모델

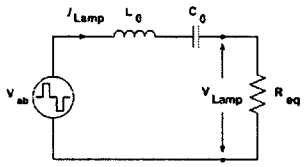


그림 7. 비대칭 하프브리지 인버터의 간이 등가회로

그림 7에서 $R_{eq}-L_0-C_0$탱크는 구형파전압원에 의해서 구동되고, 외부전극 형광램프의 등가모델은 램프전력의 변화에 따라서 계산되는 저항성분으로 간주되며, L_0-C_0 성분값은 다음 분석으로부터 결정될 수 있다. 정상상태에서, 그림 7에 나타낸 간이 등가회로의 출력전압함수로 변환된 입력은 식 (6), (7)로 나타낼 수 있다.

$$G(j\omega)=\frac{V_0(j\omega)}{V_{ab}(j\omega)}=\frac{1}{1+j\omega L_0/R_{eq}-j/\omega C_0R_{eq}}=\frac{1}{1+jQ_s(\omega/\omega_r-\omega_r/\omega)} \quad (6)$$

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

정상상태해석을 위한 회로 파라미터는 다음식과 같다.

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

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

5. 실험결과 및 고찰

본 연구에서 확립한 외부전극 형광램프의 등가모델로부터 인버터의 구동특성을 확인하기 위해 표 2의 파라미터의 설계조건을 통하여 시뮬레이션 및 실험을 수행하였다.

표. 2 회로파라미터

$V_{rms}=1.25[kV]$	$V_{in}=200\,V$
$I_{rms}=104.5[mA]$	$f_r=47[kHz]$
$R_{Lamp}=11.96[k\Omega]$	$P_{out}=60[W]$

표 2의 회로 파라미터로부터 L과 C는 각각 $L=12.8mH$, $C=17.637uF$으로 결정될 수 있었으며, 누설인덕턴스는 $L_{lkg}=192\mu H$이다. 그림 8에 시뮬레이션에 사용된 모델을 제시하였다.

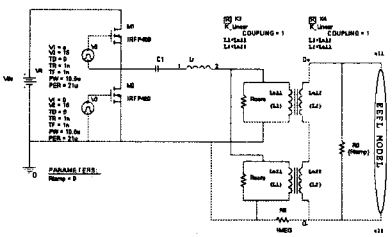


그림 8. 비대칭 하프브리지 인버터 시뮬레이션 모델

그림 9, 10, 11은 전력레벨에 따라서 측정한 램프의 전압 및 전류파형과 시뮬레이션 파형을 나타내고 있다. 전력레벨에 따른 외부전극 형광램프의 전압, 전류의 실험은 52W, 34W, 15W에서 실시하였으며, 등가모델을 적용한 시뮬레이션 결과와 상호 일치함을 확인 할 수 있다.

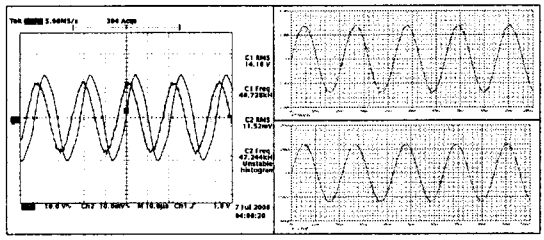


그림 9. 실효치 전압 및 전류파형[램프전력 52W]
(a) 실험파형 (b) 시뮬레이션 파형

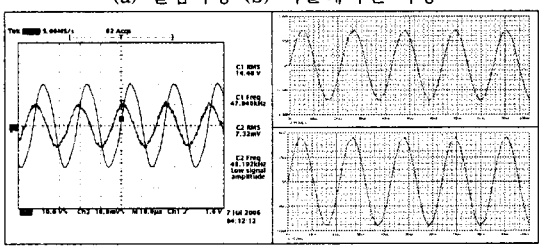


그림 10. 실효치 전압 및 전류파형[램프전력 34W]
(a) 실험파형 (b) 시뮬레이션 파형

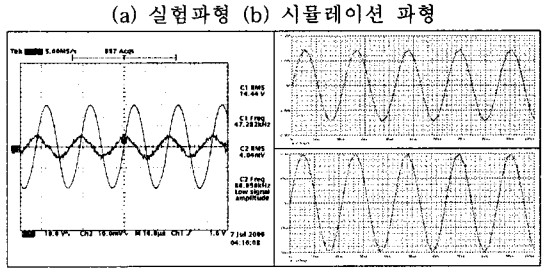


그림 11. 실효치 전압 및 전류파형[램프전력 15W]
(a) 실험파형 (b) 시뮬레이션 파형

6. 결 론

본 연구에서는 전계방전특성을 갖는 60[W] 직관형 10등 외부전극 형광램프를 대상으로 등가모델에 대한 특성으로부터 이를 구동할 수 있는 하프브리지 인버터의 구동특성에 대하여 연구를 진행하였다. 실험에 의한 관측과 물리적 이론에 근거하여 외부전극 형광램프의 전기적 응답을 예측할 수 있는 동작모델을 제시하여 시뮬레이션 하였다. 각 전력 레벨에 따른 실험 및 시뮬레이션 수행결과 상호 일치함 확인할 수 있다.

감사의 글

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

[참 고 문 헌]

[1] J. J. Thomson, "Electrodeless Discharge Light Bulb," Ph osophical Mag, vol. 32, pp. 32-44, 1891.
[2] G. I. Babat, "Discharge Lamp with two less electrodes," J. Inst, Elect, Eng, pt, 3, vol. 94, pp. 27-37, 1947.
[3] T. S. Cho, Y. M. Kim, N. O. Kwon, S. J. Kim, J. G. K ng, E. H. Choi, and G. S. Cho, Jpn. J. Appl. Phys., pt. 2 vol. 41, no. 3B, pp. L355-L357, 2002.
[4] T. S. Cho, Y. M. Kim, N. O. Kwon, S. J. Kim, J. G. K ng, E. H. Choi, and G. S. Cho, Jpn. J. Appl. Phys., pt. 1 vol. 41, no. 12, pp. 7518-7521, 2002.
[5] T. S. Cho, N. O. Kwon, Y. M. Kim, H. S. Kim, S. J. m, J. G. Kang, E. H. Choi, and G. S. Cho, "Capacitive cupl ed electrodeless discharge backlight driven by squar pulses," IEEE Trans. Plasma Scl., vol. 30, no.