

주파수변화에 따른 형광램프 전압, 전류의 이론적 계산

(A Theoretical Calculation of Fluorescent Voltage and Current on Frequency Variation)

이진우, 남택주

(Chin-Woo Yi, Taek-Joo Nam)

호서대학교, 국립기술품질원

Abstract

The voltage and current of fluorescent lamp has been successfully calculated in the case of frequency variation. Energy states of mercury atom in the discharge process are regarded as six levels. These calculations have been accurately solved by numerically employing mixed the FDM and the 2nd Runge-Kutta method. The theoretical calculation results and experimental results were presented to verify the feasibility of the modeling. Calculation and experimental results were presented to verify the feasibility of the calculation.

1. 서론

형광램프는 가장 많이 사용되는 광원으로 조명에서 매우 중요한 위치를 차지하고 있다. 최근에는 에너지절약과 소형경량화라는 목적으로 전자식 안정기가 상당히 많이 사용되고 있다.

그리고 형광램프는 주파수에 따라 램프전압과 전류가 변화하는 현상을 보인다. 이러한 점이 고주파 이용시 형광등 회로설계를 어렵게 하고 있다. 본 논문에서는 주파수 변화에 따른 형광램프 전압과 전류의 변화를 이론적으로 계산하였다.

본 논문에서 사용한 안정기는 인덕터만을 사용한 경우로 한정하여 계산하였다.

그리고 본 논문의 계산결과의 타당성을 보이기 위하여 T-10 40[W] 형광등회로가 램프소비전력 40[W]로 고정된 경우에 대하여 이론적인 계산치와 실험치를 비교하였다.

2. 본론

2.1 회로의 수학적 모델

본 논문에서는 다음과 같은 가정을 사용한다.

- (1) 방전 플라즈마는 약이온화되어 있다.
- (2) 축방향으로 균일하며, 축대칭이다.

(3) 수은의 기저상태와 희유 가스 원자의 밀도는 축의 단면에 대하여 일정하다.

수은의 에너지레벨 중 본 논문에서는 여기레벨 $Hg(6^1P_1)$, $Hg(6^3P_0)$, $Hg(6^3P_1)$, $Hg(6^3P_2)$ 을 고려하였고, 기저레벨 $Hg(6^1S_0)$ 과 이온화레벨을 고려하여 계산하였다.

2.1.1 n_a, n_r, n_s, n_e 에 대한 연속 방정식

$$\frac{\partial}{\partial t} n_q(r,t) = -D_f \nabla^2 n_q(r,t) + n_e(r,t) [K_{eg} n_g + K_{eq} n_r(r,t) + K_{eq} n_s(r,t) - (K_{qe} + K_{qr} + K_{qs} + K_{qf}) n_q(r,t)] \dots \dots \dots (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} n_r(r,t) = -D_f \nabla^2 n_r(r,t) + n_e(r,t) [K_{eg} n_g + K_{eq} n_r(r,t) + K_{er} n_s(r,t) - (K_{re} + K_{rg} + K_{rs} + K_{rf}) n_r(r,t)] - \frac{n_r(r,t)}{\tau_{rf}} \dots \dots \dots (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} n_s(r,t) = -D_f \nabla^2 n_s(r,t) + n_e(r,t) [K_{eg} n_g + K_{eq} n_r(r,t) + K_{er} n_s(r,t) - (K_{se} + K_{sg} + K_{sr} + K_{sf}) n_s(r,t)] \dots \dots \dots (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} n_e(r,t) = -D_e \nabla^2 n_e(r,t) + n_e(r,t) [K_{eg} n_g + K_{eq} n_r(r,t) + K_{er} n_s(r,t) + K_{ef} n_f(r,t)] \dots \dots \dots (4)$$

2.1.2 전자에너지 보존 방정식

$$\frac{d}{dt} \{n_e(0,t) U_e(t)\} = n_e(0,t) [-\chi v_{coll} \{U_e(t) - U_g\} + \mu_e \{F(t)\}^2 + \sum_{ij} K_{ij} n_i(0,t) \Delta U_{ij}] - \frac{n_e(r,t)}{\tau_{eff}} \Delta U_e \times 1.1 \dots \dots \dots (5)$$

2.1.3 회로 방정식

인덕터 안정기회로에 대하여 회로 방정식을 세우면 다음과 같다.

$$L_c \frac{dI(t)}{dt} + R_c I(t) + VI(t) = Vs(t) \dots \dots \dots (6)$$

2.1.4 전류 계산식

전류 계산식은 다음과 같다.

$$I(t) = 2\pi q \mu_e F(t) \int_0^R n_e(r, t) r dr \dots \dots \dots (7)$$

2.2 수학적 해석

식(1)-(4)는 시간 변수(t)와 길이 변수(r)을 갖는 연립 편미분 방정식이다. 또한 식(5), (6)은 시간 변수(t)를 갖는 연립 상미분 방정식이다. 이들 방정식을 FDM과 2계 Runge-Kutta방법의 혼합법을 사용하여 수치적으로 풀어 해를 구하였다.

경계조건은 r=0 즉, 축에서는

$$\frac{\partial n_d}{\partial r} = \frac{\partial n_r}{\partial r} = \frac{\partial n_s}{\partial r} = \frac{\partial n_e}{\partial r} = 0.$$

r=R 즉, 관벽에서는

$$n_d = n_r = n_s = n_e = 0.$$

2.3 방정식의 상수 및 계수

실효 방사수명 : $t_{\text{eff}} = 1.175 \times 10^{-5}$ [sec].

273 [K], 1 [torr] 아르곤 중 수은 이온의 확산 계수 : $D_a = 31.5$ [cm²/sec].

273 [K], 1 [torr] 아르곤 중 수은 여기원자의 확산계수 : $D_f = 70.8$ [cm²/sec].

에너지 전달을 위한 전자의 충돌 주파수 :

$\nu_{\text{col}} = n_o * p (k T_e / q)^{-3.3/2}$ [/sec]. 여기에서 $n_o = 15 \times 10^8$ [s⁻¹ V^{-1.65} torr], p는 희유가스의 압력 [torr].

1회의 탄성충돌시 전달되는 에너지 손실 : $c = 2.8 \times 10^{-5}$.

전자 이동도 : $m_e = 2.05 \times 10^8 \times T_e^{-1.55}$ [cm²/V sec].

아르곤 압력 : $P_{\text{Ar}} = 3$ [torr].

램프 전압 : $V(t) = 1.2 \times F(t)$ [V].

천이비율 계수 :

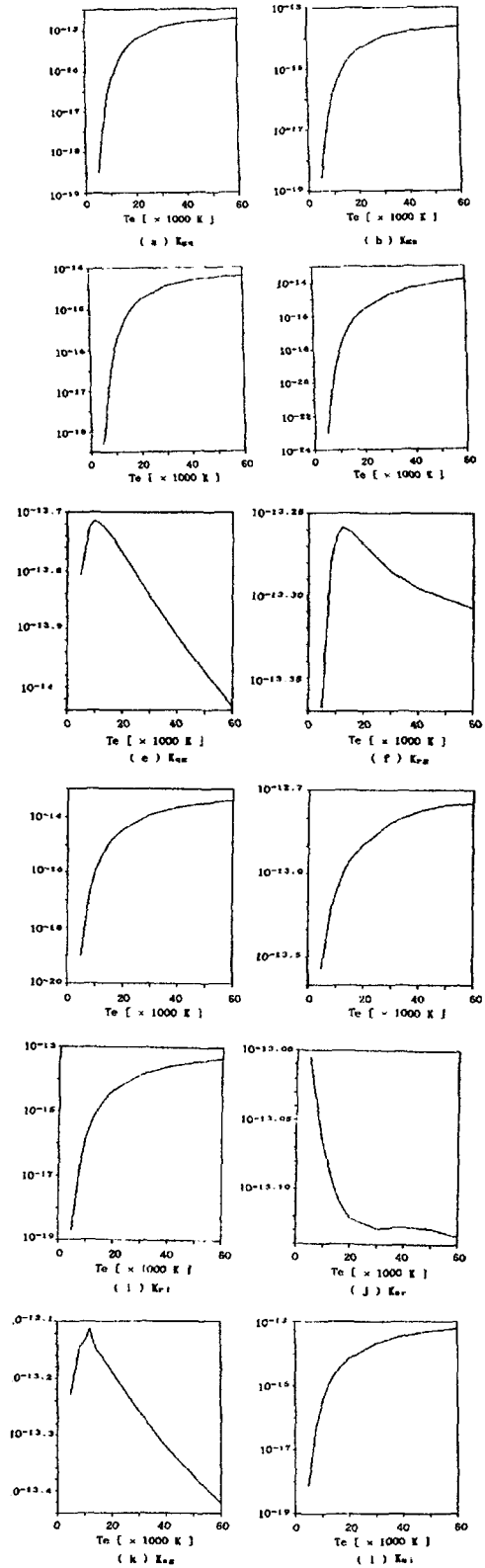
$$K_{rd} = 0.23 \times K_{sr}$$

$$K_{sq} = 0.7 \times K_{sr}$$

$$K_{qr} = 3.5 \times K_{qg}$$

$$K_{qs} = 2.5 \times K_{qg}$$

각레벨 사이의 충돌단면적으로부터 계산된 전자온도에 따른 천이비율계수의 값은 다음 그래프와 같이된다.



2.4 실험 결과

본 모델의 타당성은 40[W] T-10 램프(관벽온도 40[°C])에서 소비전력이 40[W]로 일정한 경우에, 60~10[kHz] 주파수범위에 따른 램프 전압과 전류의 실효치를 계산치와 비교하여 본 논문의 타당성을 검증하였다.

그림 1에 램프 전압과 전류 파형의 계산치와 시플레이션 결과를 도시하였다.

결과를 검토하여 본 결과 램프전압은 3.5%, 램프전류는 2% 범위의 오차 이내로 들어감을 볼 수 있었다.

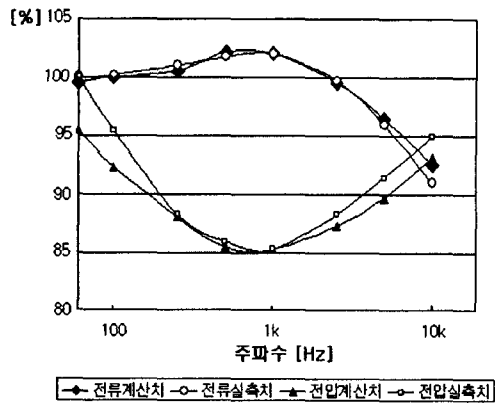


그림 1. 일정전력에서 주파수에 따른 램프 전압, 전류변화

3. 결론

본 논문에서는 주파수 변화에 따른 형광램프의 전압과 전류의 변화를 이론적으로 계산하여, 실험값과 비교하였다. 결과는 램프전압과 전류의 변화를 정확히 따라가고 있으며, 그 값의 오차도 5% 이내로 아주 우수하게 나타났다. 따라서 본 논문에서 개발한 수식을 사용하면, 인덕터를 안정기로 사용하는 전자식 안정기 설계시 시간과 노력을 크게 줄여줄 수 있을 것이다. 앞으로 인덕터와 커패시터를 함께 사용하는 형광등회로에 대한 연구가 계속된다면, 보다 현실적인 형광등 안정기 설계법을 도출할 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

- [1] T. H. Yu, H. M. Huang, and T. F. Wu, "Self-Excited Half-Bridge Series Resonant Parallel Loaded Fluorescent Lamp Electronic Ballasts", IEEE APEC Conference Record 1995, pp. 657-664.
- [2] Sun, Yiyong, "Using PSpice to Determine Lamp Current Variations Due to Electronic Ballast Component Tolerance", IEEE IAS Conference Record 1994, pp.1974-1978
- [3] U. Mader and P. Horn, "A Dynamic Model for the Electrical Characteristics of Fluorescent Lamps", IEEE IAS 1992, pp. 1928-1934
- [4] Ning Sun and Bryce Hesterman, "PSpice High Frequency Dynamic Fluorescent Lamp Model", IEEE 1996, pp.641-647
- [5] Koichi Wani, "Simulation Model for Fluorescent Lamps", J. Illum. Engng. Inst. Jpn. Vol. 73, No. 9 1989, pp. 8-12
- [6] Cayless, M. A., "Theory of the Positive Column in Mercury - Rare Gas Discharge", Brit. J. Appl. Phys. Vol. 14, No. 12, 1963, pp. 863-869