

인덕터 안정기용 형광램프 모델링

(A Fluorescent Lamp Modeling for Inductor Ballast)

이진우*

(Chin - Woo Yi)

요 약

본 논문에서는 내부 입자의 반경방향 분포와 구동회로를 고려한 형광램프 모델링을 수행하였다. 모델링에서 전자에너지 분포는 Maxwellian으로 가정하였으며, 전자 이동도와 유극성 확산계수는 상수를 사용하였다. 방전 중 수은원자는 6가지 에너지레벨을 갖는다고 가정하였다. 모델을 사용하여 4개의 편미분 2개의 상미분 연립방정식을 FDM과 2계 Runge-Kutta 방법을 사용하여 수치적으로 해를 구하였다. 개발한 모델을 실제 형광램프와 LR안정기 회로에 적용하여 실험적으로 측정된 전압, 전류 파형과 수치해석적으로 구한 전압, 전류 파형을 비교하여, 본 형광램프 모델링의 타당성을 보였다.

Abstract

The fluorescent lamp has been successfully modeled by employing the radial variation of particle density and considering driving circuit effects on the characteristics of discharge process. The electron energy distribution is assumed to have a Maxwellian. The electron mobility and the ambipolar diffusion coefficients are considered to vary with an electron energy rather than a simple uniform value. Energy states of mercury atom in the discharge process are regarded as six levels rather than simple 4 or 5 levels. These discharge processes have been accurately solved by numerically employing mixed the FDM and the 2nd Runge-Kutta method. This model was applied to analyzing real circuit. Simulation and experimental results were presented to verify the feasibility of the modeling. Simulation and experimental results were presented to verify the feasibility of the modeling.

Key Words : fluorescent lamp, radial variation of particle density, driving circuit

1. 서 론

형광램프는 가장 많이 사용되는 광원으로 조명에

서 매우 중요한 위치를 차지하고 있다. 특히 디스플레이 장치가 대형화 되는 현재의 상황에서 백라이트용 고효율 광원에 대한 요구가 커지고 있으며, 이러한 요구에 부합하는 광원으로 형광램프가 다시 주목받기 시작하고 있다. 그런데 형광램프는 그 특성이 부특성이므로 수동소자를 이용한 등가회로가 성립하지 않아, 모델링 및 해석이 매우 어렵다.

그리고 형광램프는 기동과 방전유지를 위하여 안정기가 반드시 필요하며, 형광등회로에 적합한 안정

*주저자 : 호서대학교 전기정보통신공학부 부교수

Tel : 041-540-5655, Fax : 041-540-5693

E-mail : leejw@office.hoseo.ac.kr

접수일자 : 2003년 7월 18일

1차심사 : 2003년 7월 25일

2차심사 : 2003년 10월 9일

심사완료 : 2004년 1월 9일

조명·전기설비학회논문지 제18권 제1호, 2004년 1월

기를 설계하기 위하여 형광램프의 전기적 특성 모델링은 필수적이다.

그러므로 안정기회로 설계시 적용이 가능한 형광램프의 수식모델의 개발이 필요하며, 이러한 모델은 형광램프용 안정기 설계의 효율성을 제고할 수 있어, 설계에 필요한 시간과 자원의 절감이 가능할 것이다.

본 논문에는 형광램프용 자기식 안정기 설계에 필요한 형광램프의 전기적 특성 모델링을 수행하였다.

형광램프를 비롯한 방전램프의 모델링에 관한 연구들은 다음과 같이 분류 할 수 있다.

㉑ 등가콘덕턴스 모델 : 방전램프의 전기적 특성을 시뮬레이션하는 방법(S. C. Peek, 1968; H. Bo, 1973,1983) [1]-[3].

㉒ 에너지평형식을 이용하여 회로방정식과 함께 시뮬레이션하는 방법(J. J. Lowke, 1975; C. L. Chalek, 1981) [4],[5].

㉓ 방전관 내부에서 일어나는 전기적, 열역학적 현상을 단순화시켜서 방전관 내의 기체온도에 대한 시간적 변화를 전기적 입력에너지와 방사 및 전도에 의한 손실에너지와의 차에 비례한다고 가정하여, 이를 방전관 전체에 대한 에너지평형원리에 따라 결합시키는 방법(E. L. Laskowski, 1981) [6].

㉔ 방전기체의 에너지레벨을 고려하여, 방전관 내의 전자, 기저상태 및 여기상태의 원자에 대한 입자평형식과 전자의 에너지평형식을 구성하고, 이로부터 방전관의 물리적, 전기적 특성을 구하는 방법(J. Polman and P. C. Drop, 1972, 1974; L. Vriens, 1973) [7]-[9].

㉕ 방정식의 해를 수치해석을 이용하지 않고, 해석적인 방법을 사용하여 구하는 방법으로, 대체로 전리평형식, 여기원자에 대한 입자평형식 및 전자에너지평형식을 이용하고, 전자이동도를 간단한 형태로 표현하여, 방전변수 사이의 수식적인 관계를 구하는 방법(W. L. Lama, 1982) [10].

이상의 모델링 방법에서는 ㉒를 제외한 대부분의 경우 외부 회로방정식이 적용되지 않아 안정기 설계시에 사용이 불가능하며, ㉕의 경우는 방전램프의 특성을 측정하여 변수로 사용하기 때문에 일반적인 회로 설계에 사용할 수 없는 문제점이 있다. 본 논문에서 제시한 방법은 이론만을 사용하여 방전램프의

모델링이 가능하며, 또한 이를 회로방정식과 연립시켜 회로해석을 가능하게 하였다.

2. 본 문

2.1 회로의 수학적 모델

본 논문에서는 다음과 같은 가정을 사용한다.

- (1) 방전 플라즈마는 약이온화되어 있다.
- (2) 축방향으로 균일하며, 축대칭이다.
- (3) 수은의 기저상태와 희유가스 원자의 밀도는 축의 단면에 대하여 일정하다.

본 모델에서는 수은의 여기레벨 Hg(61P1), Hg(63P0), Hg(63P1), Hg(63P2)을 고려하였다.

2.1.1 여기원자 및 전자밀도에 대한 연속 방정식

$$\frac{\partial}{\partial t} n_q(r,t) = -D_f \nabla^2 n_q(r,t) + n_e(r,t) [K_{gq} n_g + K_{gq} n_g(r,t) + K_{nq} n_e(r,t) - (K_{gq} + K_{gq} + K_{gq} + K_{gq}) n_q(r,t)] \dots \dots \dots (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} n_r(r,t) = -D_f \nabla^2 n_r(r,t) + n_e(r,t) [K_{gr} n_g + K_{gr} n_g(r,t) + K_{nr} n_e(r,t) - (K_{gr} + K_{gr} + K_{gr} + K_{gr}) n_r(r,t)] - \frac{n_r(r,t)}{\tau_{eff}} \dots \dots \dots (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} n_s(r,t) = -D_f \nabla^2 n_s(r,t) + n_e(r,t) [K_{gs} n_g + K_{gs} n_g(r,t) + K_{ns} n_e(r,t) - (K_{gs} + K_{gs} + K_{gs} + K_{gs}) n_s(r,t)] \dots \dots \dots (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} n_e(r,t) = -D_e \nabla^2 n_e(r,t) + n_e(r,t) [K_{ge} n_g + K_{ge} n_g(r,t) + K_{ne} n_e(r,t) + K_{ne} n_e(r,t)] \dots \dots \dots (4)$$

윗 식에서 변수 r은 램프의 반경방향, 변수 t는 시간을 나타낸다. nq는 63P0여기원자의 밀도, nr은 63P1여기원자의 밀도, ns는 63P2여기원자의 밀도, ng는 기저상태 원자의 밀도, ne는 전자의 밀도를 나타내며, Kxy는 x여기레벨에서 y여기레벨로의 천이 비율계수이다. Df는 수은 여기원자의 확산계수, Da는 전자의 유극성 확산계수이며, treff는 r여기레벨의 실효방사수명을 나타낸다.

2.1.2 전자에너지 보존 방정식

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

윗 식에서 U_e 는 전자의 에너지, x 는 전자와 아르곤원자와의 충돌시 전자의 에너지 손실, v_{coll} 은 전자와 수은원자의 충돌주파수, U_0 는 수은 기저레벨의 에너지, μ_e 는 전자의 이동도, $F(t)$ 는 램프 내 전계의 세기, ΔU_{xy} 는 x 여기레벨과 y 여기레벨의 에너지차를 나타낸다. 식(5)의 마지막 항의 1.1은 수은원자의 공진방사에너지 중 185[nm] 파장이 253.7[nm] 파장에너지의 10%로 가정함을 나타낸다.

2.1.3 회로 방정식

램프를 구동하기 위한 전원 및 인덕터 안정기를 40[W] T-10램프와 직렬로 연결한 회로는 그림 1과 같이 구성되며, 이 회로에 대하여 회로 방정식을 세우면 다음과 같다.

$$L_c \frac{d}{dt} I(t) + R_c I(t) + V_l(t) = V_s(t) \dots \dots \dots (6)$$

윗 식에서 L_c 는 인덕터의 인덕턴스, R_c 는 인덕터의 저항값을 나타내며, 모델링에 사용한 값은 그림 1에 표시하였다. $I(t)$ 는 회로전류, $V_l(t)$ 는 램프전압, $V_s(t)$ 는 전원전압을 나타낸다. 본 논문에서 사용한 전원은 60[Hz] 220[V] 정현파 전압이다. 전류는 식(7)로 표시된다.

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

식(7)에서 q 는 전자의 전하량, R 은 램프의 반경을 나타낸다.

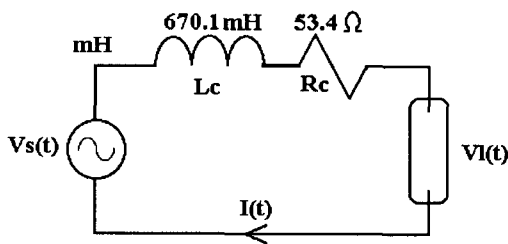


그림 1. 모델링에 사용한 형광등 회로
Fig. 1. A fluorescent lamp circuit for modeling

2.2 수학적 해석

식(1)-(4)는 시간 변수(t)와 길이 변수(r)을 갖는

조명 · 전기설비학회논문지 제18권 제1호, 2004년 1월

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 축에서는 Dirichlet condition을 관벽에서는 Neumann condition을 사용하였다.

2.3 방정식의 상수 및 계수

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

▷273 [K], 1 [torr] 아르곤 중 전자의 유극성 확산계수 : $Da = 31.5$ [cm²/sec].

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

▷에너지 전달을 위한 전자의 충돌 주파수 : $v_{coll} = n_o * p (k T_e / q) - 3.3/2$ [/sec]. 여기에서 $n_o = 15 \times 10^8$ [s⁻¹ V^{-1.65} torr], p 는 희유가스의 압력 [torr].

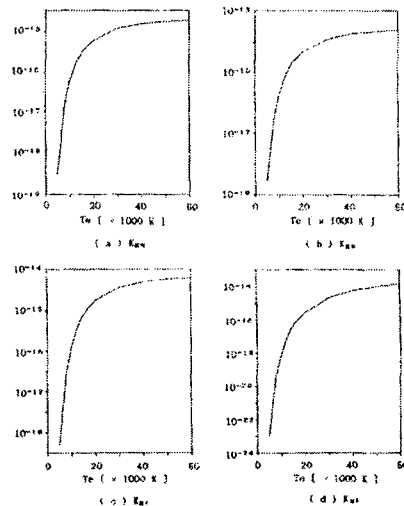
▷1회의 탄성충돌시 전달되는 에너지 손실 : $x = 2.8 \times 10^{-5}$.

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

▷아르곤 압력 : $P_{Ar} = 3$ [torr].

▷램프 전압 : $V_l(t) = 1.2 \times F(t)$ [V].

▷천이비율 계수 : 다음 그래프에 전자온도에 따라 계산된 천이비율계수를 나타내었다.



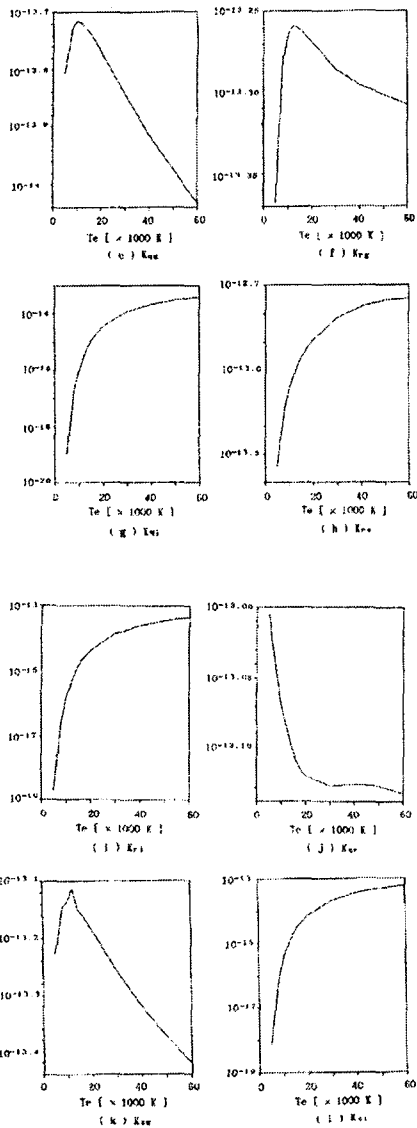


그림 2. 천이확률계수
Fig. 2. The transition rate coefficients

그래프에 없는 계수는 다음과 같이 가정하였다.

$$\begin{aligned}
 K_{rq} &= 0.23 \times K_{sr} \\
 K_{sq} &= 0.7 \times K_{sr} \\
 K_{qr} &= 3.5 \times K_{qg} \\
 K_{qs} &= 2.5 \times K_{qg}
 \end{aligned}$$

2.4 실험 결과

본 모델의 타당성은 40[W] T-10 램프(관벽온도 40[°C])에 대한 램프 전압과 전류의 파형과 전류-전압 특성 곡선을 시뮬레이션 결과와 측정 결과를 비교하여 검증하였다.

그림 3에 램프 전압과 전류 파형의 시뮬레이션 결과를 그림 4에 이들의 실험 결과를 도시하였다. 또한 그림 5에 램프 전류-전압특성의 시뮬레이션 결과를 나타내었다.

이들 결과를 비교하여 보면 형광램프의 비선형 특성에도 불구하고 그 형태가 아주 유사함을 알 수 있어, 본 논문이 실제 안정기 설계 등에 잘 적용될 수 있음을 알 수 있다.

표 1에 시뮬레이션과 측정된 램프의 전압과 전류의 실효값을 나타내었다.

표 1. 램프전압과 전류의 시뮬레이션과 측정 실효값
Table 1. Simulated and measured values of rms voltage and current

	시뮬레이션 값	측정값	비율[%]
램프전압	110[V]	114[V]	96.5
램프전류	378[mA]	346[mA]	109

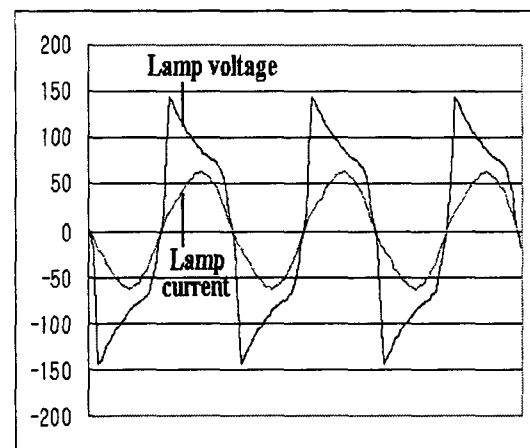


그림 3. 램프 전압, 전류의 시뮬레이션 결과
Fig. 3. A simulation result of lamp voltage and current

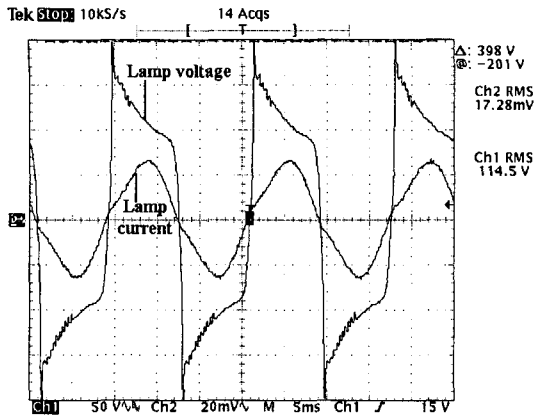


그림 4. 램프 전압, 전류의 측정결과
 Fig. 4. A measuring result of lamp voltage and current

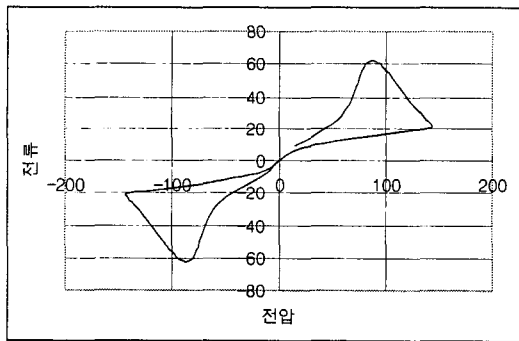


그림 5. 램프 전류-전압 특성 시뮬레이션 결과
 Fig. 5. A simulation results of lamp current-voltage characteristics

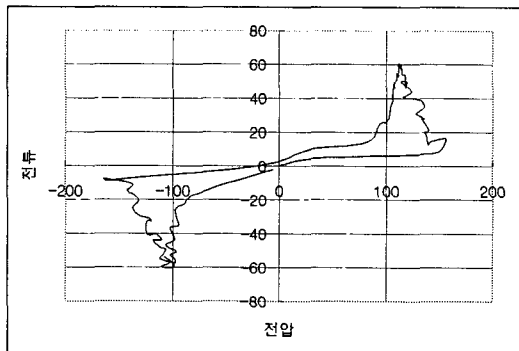


그림 6. 램프 전류-전압 특성 측정결과
 Fig. 6. A measuring result of lamp current-voltage characteristics

3. 결론

본 논문에서는 인덕터 안정기에 적용 가능한 형광램프 모델을 제안하였다. 제안된 모델을 40[W] T-10 형광램프에 적용하여 램프전압과 전류 파형을 시뮬레이션 결과와 측정결과를 비교하여 본 결과 파형이 아주 유사함을 확인할 수 있었으며, 램프전압과 전류의 실효치를 비교한 결과 시뮬레이션 결과가 측정 결과 대비 전압은 96.5[%], 전류는 109[%]로 나타났다. 이 차이는 자료확보의 부족으로 인하여 모델의 가정에서 배제된 변수들로 부터 오는 것으로 사료된다. 그러나 종합적으로 결과를 검토한 결과 실제 안정기 회로 설계에 적용할 수 모델의 타당성을 입증할 수 있었다.

이 모델은 형광램프의 동작 특성을 이해하는데 유용한 도구가 될 것이며, 형광램프용 자기식 안정기의 설계에 도움을 줄 것이며, 특히 고효율 디스플레이용 광원으로 광범위한 사용이 예상되는 열음극 형광등회로의 인덕터 안정기 설계에서 시간과 노력을 크게 줄여줄 수 있을 것이다.

앞으로 더욱 정확한 해를 얻기 위한 모델에는 정확한 전자분포함수, 공진방사 및 전극 전압 강하에 대한 문제가 해결되어야 할 것이다.

References

- (1) Peek, S.C. and Spencer, D.E., "A differential equation for the fluorescent lamp", J. of IES, Vol. 63, No. 4, pp. 157-165, Apl. 1968.
- (2) Bo, H. and Masumi, K., "Analysis of operation circuits for discharge lamps by the simulation method", J. of IES, pp. 92-98, Jan. 1976.
- (3) Ozaki, S., Katayame, S. and Bo, H., "Lamp model equations taking into account the radial temperature profile of arc plasma", J. Illum. Eng. Inst. Jpn., Vol. 67, No. 2, pp. 49-54, 1983.
- (4) Lowke, J.J. and Zollweg, R.J., "Theoretical description of AC arcs in mercury and argon", J. Appl. Phys., Vol. 46, No. 2, pp. 650-660, 1975.
- (5) Chalek, C.L. and Kisinger, R.E., "A theoretical investigation of the pulsed high pressure sodium arc", J. Appl. Phys., Vol. 52, No. 52, pp. 419-426, 1981.
- (6) Laskowski, E.L. and Donoghue, J.F., "A model of a mercury arc lamp's terminal V-I behavior", IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. IA-17, No. 4, pp. 419-426, 1981.
- (7) Polman, J., von der Werf, J.E. and Drop, P.C., "Nonlinear effects in the positive column of a strongly modulated mercury-rare gas discharge", J. Phys. D: Appl. Phys.,

- Vol.5, pp. 266-279, 1972.
- [8] Verbeke, T.G. and Drop, P.C., "The positive column of low pressure Hg/Ne and Hg/Ne/Ar discharges", J. Phys. D: Appl. Phys., Vol. 7, pp. 1677-1683, 1974.
 - [9] Vriens, L., "Energy Balance in low pressure gas discharges", J. Appl. Phys., Vol. 45, pp. 1191-1195, 1974.
 - [10] Lama, W. L., Gallo, C.F., Hammond, T.J. and Walsh, P.J., "Analytical model for low-pressure gas discharges: application to the Hg+Ar discharge", Appl. Opt., Vol. 21, No. 10, pp. 1801-1811, 1982.

◇ 저자소개 ◇

이진우 (李鎭雨)

1984년 서울공대 전기공학과 졸업. 1984년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1990~1994년 세명백트론(주) 연구실장. 1994년~현재 호서대학교 전기정보통신공학부 교수. 본 학회 편수이사.