

저압 방전등 교류 점등 특성의 이론적 예측

Theoretical Prediction of AC Characteristics of Low Pressure Lamps

池 哲 根* · 張 禹 鎭** · 呂 寅 善[§] · 李 鎭 雨^{§§}
(Chol-Kon Chee · Woo-Jin Chang · In-Sun Yeo · Chin-Woo Yi)

요 약

본 논문에서는 방전등 내부에서 일어나는 여러가지 물리적 현상 및 특성을 고찰하고, 이로부터 방전등의 전기적 특성을 예측할 수 있는 수식 모델을 개발하였다. 수식모델 개발에 사용된 방전등은 저압 수은-아르곤 방전을 이용하는 형광등이다. 저압 수은-아르곤 방전에서 수은의 각 여기 원자 밀도의 연속 방정식, 전자 밀도의 연속 방정식과 전자 에너지의 평형식으로 방전등 내부의 제물리량들을 표현할 수 있으며, 이들을 회로방정식과 연결하면 방전등의 전기적 특성을 예측할 수 있다. 모델의 유용성을 검증하기 위하여, 전원의 주파수가 5KHz, 8KHz, 10KHz 및 13KHz인 경우에 대하여, 인덕터 안정기를 사용한 경우 형광등의 관전압 및 전류를 계산하였다. 계산 결과는 전압과 전류의 파형이 실측치와 잘 일치하였으며, 전압과 전류의 실효치는 실측치와 5[%] 이내의 오차를 가지는 것으로 나타났다.

Abstract- In order to develop a mathematical model which can predict the operating voltage and current of a discharge lamp, the properties and the physical phenomena of a low pressure gas discharge are investigated. Fluorescent lamp which uses a low pressure mercury-argon gas discharge is used in the model development. In a low pressure mercury-argon gas discharge, the continuity equation for each excited atom and electron, and the electron energy balance equation can predict the physical quantities of discharge. By coupling these equations and the circuit equation, the electrical characteristics of the discharge lamp can be predicted. To verify the validity of the suggested model, we calculated the voltage and current of a fluorescent lamp operating with inductor ballast for source frequency of 5KHz, 8KHz, 10KHz, and 13KHz. The results show good agreements in wave forms between the measured voltage and current, and the difference between the measured and calculated one is less than 5[%].

1. 서 론

현재 광원으로 백열 전구, 할로겐 전구, 형광 등, 수은등, 메탈 할라이드등, 고압 나트륨등 및 저압 나트륨등 등의 여러 가지가 사용되고 있다. 일반적으로 방전등은 백열 전구에 비하여, 발광 효율이 높고 수명이 긴 장점이 있다. 그러나, 방전등의 연색성은 일반적으로 백열 전구에 비하여 떨어지는 편이고, 방전등의 전기적 부특성으로 인하여 점등시에는 항상 한류 소자인 안정기가 함께 사용되어야 하며, 재점등에 시간이 소요되고, 방전등을 포함한 등기구의 설치 비용이 백열 전구보다 고가이고, 발광 광속의 제어가 백열 전구에 비하여 까다롭다는 단점이 있다. 최근, 이러한 단점의 보완책으로 방전등에 사용되는 형광물질의 개선 및 방전등의 고주파 점등이 저압 방전등인 형광등을 중심으로 연구되고 있다. 방전등 사용시 단점의 보완책으로 채택되는 방전등의 고주파 점등은 상용 주파수 점등에 비하여 다음과 같은 장점이 있다. [1], [2]

- (1) 안정기 회로의 일부로서 광속 제어회로를 구성하여, 발산 광속의 제어를 용이하게 한다.
- (2) 안정기 자체의 손실이 줄어들며, 발생열의 감소로 공조 설비의 용량이 줄어든다.
- (3) 안정기의 크기 및 무게가 줄어든다.
- (4) 발광효율이 높아진다.
- (5) 빛의 어른거림이 줄어든다.
- (6) 방전 개시 전압이 낮아진다.

이들 장점에도 불구하고 방전등의 고주파점등이 널리 사용되지 않고 있는 이유 중의 하나는 방전등의 전기적 특성이 방전등의 종류, 구조, 봉입 가스 조건 및 외부 인가 전압의 크기, 파형 및 사용되는 한류 소자의 종류에 따라 광범위하게 변화하기 때문이다. 방전등을 고주파 점등하기 위하여 전자 안정기 및 고주파 전원 설비를 설계해야 하는데, 방전등의 전기적 특성이 위와 같이 광범위하게 변화하는 관계로 안정기 및 전원 설비의 설계가 어렵다.

방전등의 점등에 사용되는 안정기 및 전원 설비의 용이한 설계를 위하여 방전등의 전기적 특성을 표현하는 방법이 필요하다. 방전등의 특성을 수식 모델로 표현할 수 있다면 방전등을 포함한 안정기 및 전원 설비의 해석은 물론 수식 모델의 변수 변화만으로 다양한 시스템의 최적 설계가 가능하고, 실제 실험을 최소한으로 줄일 수 있다. 이 점은 일반 시뮬레이션에서와 마찬가지로 시간과 경비의 절약에 기여한다.

본 논문에서 사용된 모델과 기존 모델과의 차이점은 다음과 같다. 모델식에 쓰이는 전이 확률계수는 전자 에너지의 분포를 2-EGM으로 가정하고 구하였다. 각 레벨간의 전이 확률 계수를 온도의 함수로 구하였다. 여기 원자들의 밀도 차이에 의한 확산을 고려하였다. 회로 방정식으로부터 방전관의 전압 및 전류의 변화를 예측할 수 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 본 장의 서론에 이어 모델 방정식의 구성에 대하여 기술하였고, 본 논문에서 사용된 측정 회로와 방정식을 사용하여 얻어진 결과 및 실제 측정값들과 비교하고 그의 유용성에 대하여 검증하였다. 결론에서는 본 논문의 내용을 요약하였다.

2. 본 론

2.1 전제 조건

형광등의 특성을 수식 모델화 하기 위하여 글로우 방전의 특성으로부터 다음과 같은 조건을 가정한다.

- (1) 입자간의 충돌은 전자와 수은 원자 및 전자와 아르곤 원자 사이에만 존재한다. [3]
- (2) 전자는 수은 원자와 비탄성 충돌을 하며 아르곤 원자와는 탄성 충돌을 한다. [3] [4]
- (3) 이온의 손실은 유극성 확산에 의해 관벽에서 일어나며 이온의 체적 손실은 무시한다. [3]
- (4) 전자의 에너지 분포는 2-EGM을 사용한다. 또한, 전자의 에너지 분포는 반경 방향에 무관하다. [5]
- (5) 전자 및 수은의 여기 원자의 밀도는 반경 방향으로 포물선 분포를 가정한다. [6]

2.2 모델 방정식의 구성

앞 절에서 보인 여러 가지 전제 조건으로부터 수은의 여기 원자 및 전자 밀도에 대한 연속 방정식과 전자의 에너지 평형식을 다음과 같이 구성할 수 있다.

*正 會 員 : 서울大 工大 電氣工學科 教授 · 工博
 **正 會 員 : 서울産業大 電氣工學科 助教授 · 工博
 §正 會 員 : 全南大 工大 電氣工學科 助教授
 §§正 會 員 : 서울大 工大 電氣工學科 助教
 接受日字 : 1989年 3月 20日
 1次修正 : 1989年 5月 27日

2.2.1 수은의 여기 원자 및 전자의 연속 방정식

방전 기체의 각 입자의 연속 방정식은 다음과 같이 표현된다.

입자 밀도의 변화율 = 확산 + 충돌에 의한 여기 + 충돌에 의한 de-excitation + 충돌에 의한 이온화 + 실효 자발 방사

수은의 여기 원자 및 전자의 밀도에 대한 연속 방정식은 다음과 같이 표현된다. 고려된 수은의 여기 원자의 에너지 준위는 6^3P_0 , 6^3P_1 , 6^3P_2 및 6^1P_1 이다. 고려된 에너지 준위 및 준위 사이의 천이를 그림 1에 보인다. 이들 준위는 그림 1(a)에서 각각 q, r, s 및 p로 표시하며, g는 기저 원자, i는 이온을 표시한다. 에너지 준위 사이의 실선은 에너지 준위간의 천이를 표시하며 2중 실선은 공진 방사를 표시한다. 그림 1(b)에 천이 확률 계수의 개념을 도시한다.

6^3P_0 준위의 시간당 밀도 변화는 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t} n_q(r,t) = -D_q \nabla^2 n_q(r,t) + n_e(r,t) [k_{gq} n_g + k_{rq} n_r(r,t) + k_{sq} n_s(r,t)] - [k_{qg} + k_{qr} + k_{qs} + k_{qi}] n_q(r,t)$$

6^3P_1 준위의 시간당 밀도 변화는 6^3P_0 준위에서와 유사하며, 다른 점은 공진 방사에 의한 손실을 고려하여야 하는 점이다.

$$\frac{\partial}{\partial t} n_r(r,t) = -D_r \nabla^2 n_r(r,t) + n_e(r,t) [k_{gr} n_g + k_{qr} n_q(r,t) + k_{sr} n_s(r,t) - [k_{rg} + k_{rq} + k_{rs} + k_{ri}] n_r(r,t)] - \frac{n_r(r,t)}{\tau_{eff}}$$

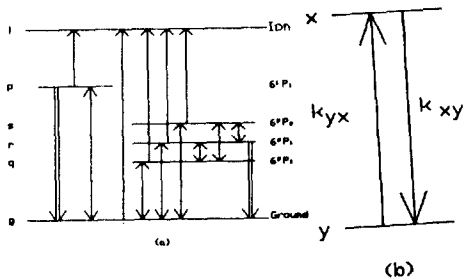


그림 1 모델링에 사용된 에너지 레벨 및 레벨간의 천이와 개념도

Fig. 1 Energy levels used in modeling and the schematic diagram of the transitions between the levels

6^3P_2 준위의 시간당 밀도 변화는 6^3P_0 준위와 유사하다.

$$\frac{\partial}{\partial t} n_s(r,t) = -D_s \nabla^2 n_s(r,t) + n_e(r,t) [k_{gs} n_g + k_{qs} n_q(r,t) + k_{rs} n_r(r,t)] - [k_{sg} + k_{sq} + k_{sr} + k_{si}] n_s(r,t)$$

6^1P_1 준위의 시간당 밀도 변화는 6^3P_1 준위와 유사하며, 공진 방사에 의한 손실을 고려하여야 한다.

$$\frac{\partial}{\partial t} n_p(r,t) = -D_p \nabla^2 n_p(r,t) [k_{gp} n_g - [k_{pg} + k_{pi}] n_p(r,t)] - \frac{n_p(r,t)}{\tau_{eff}}$$

전자의 시간당 밀도 변화는 유극성 확산에 의한 손실과 수은 원자의 이온화에 의한 생성으로 이루어진다.

$$\frac{\partial}{\partial t} n_e(r,t) = -D_a \nabla^2 n_e(r,t) [k_{gi} n_g + k_{qi} n_q(r,t) + k_{ri} n_r(r,t) + k_{si} n_s(r,t) + k_{pi} n_p(r,t)]$$

각 연속 방정식에서 우변의 첫 항은 확산에 의한 입자의 손실이다. 전자의 경우에는 확산 계수로서 유극성 확산 계수(D_a)가 사용되며, 수은 여기 원자의 경우에는 밀도 차이에 의한 확산 계수가 사용된다. 우변의 두번째 항은 각 에너지 준위의 원자와 전자간의 충돌에 의한 천이를 표시한다. 천이 확률 계수 k_{xy} 는 전자 온도의 함수이며, 전자 에너지의 분포로서 2-EGM을 가정하여 구한다. 특히 6^3P_1 과 6^1P_1 준위는 각각 253.7[nm]와 185[nm]의 공진 방사가 일어나는 준위로서, 방사에 의한 밀도의 감소를 고려하여야 한다. 이들 준위에서 각 여기 원자의 평균 수명(τ_{eff})의 역수를 각 여기 원자의 밀도에 곱하여 방사에 의한 밀도의 시간당 손실을 고려할 수 있다. [7]

2.2.2 전자의 에너지 평형식

방전관에 인가된 전계에 의해 전자가 에너지를 얻고, 전자는 아르고 원자와의 탄성 충돌과 수은 원자와의 비탄성 충돌 및 공진 방사에 의해 에너지를 잃는다. 전자 에너지의 시간당 변화는 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t} U_e(t) = n_e(r,t) [-\chi \cdot v_{col} \{ U_e(t) - U_g \}$$

$$+ q\mu_e E^2(t) + \sum_{x,y} k_{xy} n_x(r,t) \Delta U_{xy}] - \frac{\Delta U_{rg} n_r(r,t)}{\tau_{refr}} - \frac{\Delta U_{pg} n_p(r,t)}{\tau_{perf}}$$

우변 괄호 내의 첫 항은 전자가 아르곤 원자와 탄성 충돌에 의해 잃는 에너지를 표시하고 괄호 내의 둘째 항은 전자가 전계로부터 얻는 에너지를 표시하며 괄호 내의 마지막 항은 수은의 여기 원자들이 전자와 충돌하여 각 여기 레벨 사이를 천이할 때 전자가 주고 받는 에너지를 표시한다. 6^3P_1 과 6^1P_1 준위에서 공진 방사에 의한 전자의 에너지 손실은 이들 준위의 실효 수명으로 표현할 수 있고, 우변의 마지막 두 항이 공진 방사에 의한 전자의 에너지 손실을 표시한다.

2.2.3 회로 방정식

형광등을 전원에 연결하고 이 회로에 직렬로 공심 코일 안정기를 연결할 경우 회로 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$L \frac{d}{dt} I(t) + R_L I(t) + V_L(t) = V_s(t)$$

2.2.4 모델 방정식

위의 식들은 반경 r과 시간 t에 관한 연립 편미분 방정식이다. 전계 조건에서 전자 및 여기 원자의 분포를 포물선 분포로 가정하였으며, 이 분포를 $P_a(r)$ 이라고 하면 다음과 같이 표현된다.

$$P_a(r) = \left[1 - \frac{r}{R} \right]^2$$

여기서, R은 방전관의 반지름이다.

이를 사용하면 위의 식에서 반경과 시간의 함수로 표현된 전자 및 여기 원자의 밀도는 다음과 같이 두 부분으로 나뉘어 표현된다.

$$n_j(r,t) = P_a(r) n_j(t), \quad j = e, p, q, r, s$$

여기서 $n_j(t)$ 는 관 중심 부분의 입자 밀도이다.

이를 연속 방정식 및 에너지 평형식에 대입하고 방전관 단면에 대하여 적분하면 연립 상미분 방정식으로 변환된다. 예로써 6^3P_0 준위의 밀도 $n_a(r,t)$ 의 연속방정식 양변을 관 단면에서 반경 방향에 대하여 적분하고 평균을 취하면 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} & \frac{1}{\pi R^2} \int_0^{2\pi} \int_0^R \frac{\partial}{\partial t} [P_a(r) n_a(t)] r dr d\theta \\ &= \frac{1}{\pi R^2} \int_0^{2\pi} \int_0^R -D_q \nabla^2 [P_a(r) n_q(t)] r dr d\theta \\ &+ \frac{1}{\pi R^2} \int_0^{2\pi} \int_0^R P_a(r) n_e(t) [k_{gq} n_q + k_{gq} P_a(r) n_r(t) + k_{sq} n_s(t) - [k_{qg} + k_{qr} + k_{qs} + k_{qi}] Q_a(r) n_a(t)] r dr d\theta \end{aligned}$$

나머지 식들도 같은 방법으로 적분을 행하였다. 회로 방정식의 관 전압, 전류는 다음의 방법으로 구한다. 먼저, 전류는 전류 밀도를 관 단면에 대하여 적분하여 얻을 수 있다. 전류 밀도는 전자 밀도를 사용하여 다음과 같이 표현된다. 관 전압과 전계를 연결하기 위하여 다음과 같은 가정을 한다. [8]

$$\text{관 전압} = 1.2 \times \text{전계}$$

회로 방정식을 전자 밀도와 전계를 사용하여 다시 구성하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} E(t) &= \frac{1}{LK_c n_e(t)} \left[V_s(t) - E(t) \left[1.2 + K_c n_e(t) \left\{ R_L + L \left[-\frac{8}{R^2} D_a + k_{gi} n_g + \frac{2}{3} \sum_j k_{ji} n_j(t) \right] \right\} \right] \right] \end{aligned}$$

여기서,

$$K_c = \frac{\pi R^2 q \mu_e}{2}$$

이와 같은 절차로 연립 편미분 방정식을 연립 상미분 방정식으로 변환하고 식을 푼다. 미분방정식의 해는 4차의 Runge-Kutta 방법을 이용하여 구한다. 전자 및 여기 원자 밀도의 초기치는 직류에서의 값을 대입하여 한 주기를 계산하고, 한 주기 마지막 값을 다음 주기의 초기치로 대치한다. 전자 온도 및 전계의 값은 임의로 적당한 값을 최초의 초기치로 대입하고, 나머지 과정은 밀도의 계산 과정과 같다. 이렇게 하여 주기 계산을 반복한 후, 바로 전 주기와 값을 비교하여 두 값의 차이가 $10^{-4}[\%]$ 이내가 되면 계산을 중단하고 이때의 값을 계산값으로 선택한다.

3. 측정 및 검증

본 장에서는 앞에서 만든 모델 방정식을 사용하여 38mm 40W형광등의 전압과 전류를 계산하고,

실측치와 비교하였다. 모델의 범용성을 검증하기 위해, 전원의 주파수를 바꾸어 전압과 전류의 계산치를 실측치와 비교하였다.

3.1 측정 회로

공급 전압의 주파수를 변화시키며 형광등의 전기적 특성을 측정하기 위한 회로의 구성은 그림 2와 같다.

전원 회로는 방전등에 공급 전압의 주파수를 변동시켜 공급하는 부분이다. 상용 주파수의 전원으로 부터 필요한 주파수의 고주파 전력을 얻기 위하여 다음과 같은 방법을 사용하였다. 함수 발생기의 출력 신호를 선형 전력 증폭기에 입력하고, 증폭기의 출력을 직렬한 한류 소자를 통하여 방전등에 공급한다. 증폭기의 출력 주파수와 파형은 함수 발생기의 주파수 및 파형과 동일하다. 따라서, 함수 발생기의 주파수를 변화시켜 방전등 회로에 공급되는 전압의 주파수를 바꿀 수 있다. 사용한 전력 증폭기의 정격은 출력 200[W], 출력 주파수 대역 폭은 DC~50KHz이다. 공급 전압의 주파수는 함수 발생기의 출력 단자에 카운터를 연결하여 측정한다. 일반적으로 교류 측정에 사용되는 가동 철편형이나 전류계형의 전압, 전류계는 주파수가 높아지면 오차가 매우 커진다. 방전 회로 각 부분의 전압 및 전류의 측정 오차를 줄이기 위하여 각 측정 주파수에 있어서 전압, 전류의 순시치를 디지털 스토리지 스코우프로 관측하고, 이들 순시치들을 스코우프의 디스켓에 저장한 후, 그 순시치의 데이터들을 직렬 전송 인터페이스 RS-232C를 통하여 컴퓨터에 입력하여 이를 계산, 방전 회로의 전압, 전류의 실측치를 구한다. 스코우

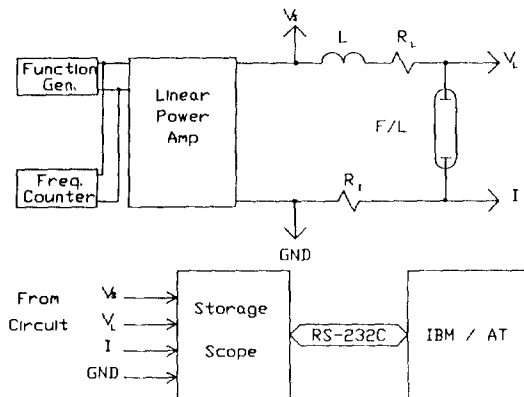


그림 2 측정회로
Fig. 2 Measurement circuits

프에 저장된 데이터를 직접 컴퓨터에 입력함으로써 수작업에서 일어날 수 있는 여러 가지 오류의 원인을 제거하였고, 데이터 수집, 전송 및 입력에 소요되는 시간을 최소화하였다. 이상의 방법으로 전원 주파수 5KHz, 8KHz, 10KHz 및 13KHz에 대하여 전원 전압, 형광등의 전압 및 전류 파형을 측정, 데이터를 저장하였다. 실험에 사용된 주파수의 범위가 비교적 좁은 이유는 낮은 주파수에서는 한류 소자인 코일의 인덕턴스 값이 커야 하나, 공심 코일로 요구되는 크기를 만들 경우 코일의 저항이 너무 커진다. 그러나 이를 피하기 위해 철심을 사용하면 철심의 히스테리시스로 인하여 전압, 전류를 쪼그러뜨리며 방전등의 전기적 특성의 해석을 방해한다. 따라서 전원 주파수가 3KHz 이상이면 적당하고, 본 논문에서는 하한을 5KHz로 하였다. 높은 주파수에서는 한류 소자에는 문제가 없으나, 측정 장비 중 스토리지 스코우프의 샘플링 주기가 길어서, 한 주기당 측정 데이터 갯수가 방전 전압, 전류 파형을 표현하기에 충분치 못하였다. 따라서 측정 주파수의 상한이 13KHz로 되었다.

3.2 모델의 유용성 검증

앞서 만들어진 연속 방정식, 에너지 평형식 및 회로 방정식을 이용하여 각각의 주파수 및 주어진 소자값에 대하여 방전등의 전압, 전류를 계산한다.

10KHz의 전원 주파수에 대하여 형광등의 전압과 전류의 계산치 및 실측치를 그림 3에 도시한다. 그림의 횡축이 시간, 종축이 관전압 및 전류

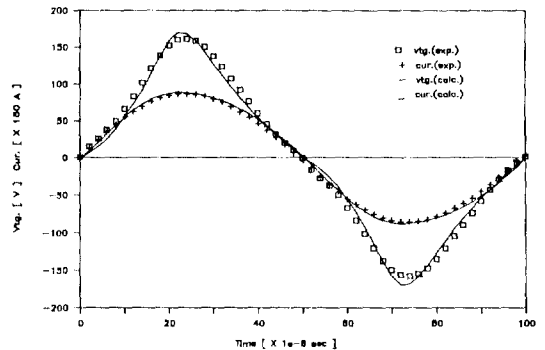


그림 3 10KHz에서 전압과 전류의 계산값 및 실측값
Fig. 3 Measurement and calculated values of the voltage and current at 10KHz

표 1 실험에 사용된 인덕턴스와 저항값
Table 1 Values of inductances and resistors used in experiments

주파수[KHz]	인덕턴스[mH]	저항[Ω]
5	12.51	9.189
8	8.249	7.466
10	6.564	7.108
13	5.461	7.940

표 2 전압과 전류의 계산치 및 실측치의 실효치와 상대오차

Table 2 Effective values and relative errors of the calculated and measured values of the voltage and current

주파수 [KHz]	전압[V]			전류[A]		
	계산치	실측치	오차 %	계산치	실측치	오차 %
5	97.7	96.3	1.45	0.453	0.445	1.80
8	100.4	101.0	0.59	0.422	0.418	0.96
10	102.0	102.7	0.68	0.429	0.413	3.87
13	98.9	101.0	2.08	0.385	0.395	2.53

를 나타낸다. 계산치는 실선으로 표시하고 실측치는 사각형 및 플러스(+) 기호로 도시한다.

실험에 사용된 다른 주파수에서도 이와 유사한 결과가 얻어졌다. 측정된 각각의 주파수에 대하여 사용된 인덕턴스 및 저항의 값을 표 1에 보인다. 또한, 이들 전압과 전류의 계산치 및 실측치의 실효치와 상대 오차를 표 2에 보인다.

실측한 4개의 주파수에 대하여 전압과 전류는 파형의 변화 모양은 물론, 표 2에서 볼 수 있듯이 실효치에 있어서도 최대 3.87[%], 최소 0.59[%]의 5[%]이내의 오차로서 실측치와 잘 맞아들었다. 오차의 주 원인으로는 모델 방정식의 회로 방정식 중에서 관 전압 $V_L(t)$ 를 전계 $E(t)$ 로 표현하는 과정에서 음극 강하를 단순히 방전 전압에 비례하는 것으로 가정한 점을 들 수 있다.

주파수가 높은 쪽에서 오차가 약간 더 크며, 이와같은 결과는 측정 장비 중 스코프의 샘플링 주기에 의해, 전원 주파수가 높을 경우에 측정 데이터의 수가 줄고, 따라서 측정 파형을 충분히 표현하지 못한 것에도 원인이 있는 것으로 생각된다. 또한, 계산된 모든 주파수에서 전원의 파형은 정현파로 가정하였으나, 공급 전원 장치의 특성상

완전한 정현파의 전원을 공급하지 못한 것에도 오차의 원인이 있는 것으로 생각된다.

4. 결 론

본 논문에서는 방전등을 포함한 회로의 해석을 비교적 간단히 할 수 있는 모델을 제시하였다. 이 모델을 사용하면, 고주파 전자 안정기의 개발이나 방전등 회로의 최적화를 컴퓨터 설계를 통하여 달성할 수 있다.

본 논문에서 제시된 방법을 요약하면, 저압 방전에서 일어나는 여러 가지 역학적 작용 및 특성의 고찰로부터, 저압 수은-아르곤 방전등인 형광등의 전자 및 수은의 여기 원자 밀도에 대한 연속 방정식과 전자에 대한 에너지 평형식을 세우고 이를 방전등의 점등 회로와 결합하여 방전등의 전압, 전류를 예측할 수 있게 하였다.

연속 방정식의 천이 확률 계수들을 저압 방전에서 전자 에너지의 분포를 실제에 더 가깝게 표현하는 2-EGM의 전자 에너지 분포를 사용하여 온도의 함수로 표시하고, 수은 여기 원자의 확산을 고려하여 모델의 정확성을 높였다. 전자의 에너지 평형식에서는 방사 손실을 고려하였으며, 이는 공진 방사를 일으키는 준위에서의 여기 원자의 평균 수명을 이용하였다. 또한, 수은의 여기 원자 및 전자의 공간적 분포는 관 중심에서 최고치를 가지며 관벽에서 0이 되는 포물선 분포로 가정하였다. 시간 및 반경 방향에 대한 연립 편미분 방정식으로 표현되는 모델 방정식을 반경에 대하여 적분함으로써, 시간에 대한 연립 상미분 방정식으로 변환하였다. 이로써 수치 해석의 난이도를 낮추게 되었다.

결과를 보면, 전원 주파수 5KHz, 8KHz, 10 KHz 및 13KHz에 대하여 전압과 전류의 실효치의 계산치와 실측치의 상대 오차가 5[%] 이내로 얻어졌다.

본 논문에서 제안된 모델은 다음과 같은 연구 과제를 가지고 있다. 본 논문에서는 여기 원자의 준위를 4개만 선택하고 있으나, 나머지 다른 준위를 더 선택하면 모델의 정확성을 약간 더 높일 수 있을 것으로 생각된다. 그리고 본 연구에서는 전계를 방전관의 전압에 비례하는 것으로 가정하고 문제를 해석하였으나, 시뮬레이션의 오차를 줄이고, 모델의 범용성을 넓이기 위하여, 양광주의 전계 및 방전관의 관전압에 영향을 주는 음극 강하(cathode fall)의 기구에 대한 연구가 이루어져야 할 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

- [1] Campbell, J.H., "High-intensity discharge lamps on high-frequency power," *Illuminating Engineering*, vol. 64, no. 12, pp.713-722, 1969.
- [2] Kenji, S. et al., "High-efficiency fluorescent lamp lighting system," *Toshiba Rev.*, vol. 39, no. 3, pp. 200-203, 1984.
- [3] Cherrington, B.E., *Gaseous electronics and gas laser*, Pegamon Press, 1979.
- [4] Vriens, L., "Multi-step ionization in the positive column of low pressure Na-Ne and Ne discharge," *J. Appl. Phys.*, vol. 49, no. 7, pp. 3814-3820, Jul. 1978.
- [5] Vriens, L., "Energy Balance in low pressure gas discharges," *J. Appl. Phys.*, vol. 44, no. 9, pp. 3980-3989, 1973.
- [6] Kenty, C., "Production of 2573 radation and the role of metastable atoms in an argon-mercury discharge," *J. Appl. Phys.*, vol. 21, pp. 1309-1318, Dec. 1950.
- [7] Weysenfeld, C.H. and Matthey, M.M.M.P., "Scaling of positive-column Hg-Ar discharges towards display cells," *IEEE Trans. Elec. Dev.*, vol. ED-24, no. 10, pp. 1239-1244, Oct. 1977.
- [8] 지 철근, 장 우진, 이 진우, "형광 램프 양광주 내의 전자 이동도 계산", *조명 전기설비 학회지*, vol. 2, no. 2, pp. 162-164, 1988.
-