

Voltage Sag에 의한 고압 방전등의 운전한계 특성 연구

A study on the characteristics of operating limits of High-Pressure discharge lamps during Voltage Sag

정성원* · 황건호 · 이현철 · 이근준 · 김재현

(Sungwon Jeong* · Keonho Hwang* · Hyunchul Lee · Geunjoon Lee · Jaehyeon Gim)

Abstract

This paper presents the results of a simulation to analyze the effects of voltage sag on high-pressure discharge lamp(400[W]). In this paper, voltage sag is considered a reduction between 0 and 0.9[p.u] in nominal voltage magnitude, with duration between 0.01 and 90cycle.

The simulation results depict the characteristics of the lamp about operating limits during voltage sag by the magnitude and duration of sag in CBEMA curve.

1. 서론

산업 현장에서 흔히 사용되고 있는 유도전동기, 컴퓨터, 고압 방전등 등의 기기들은 전압 강하에 대해 매우 민감한 특성을 가진다[1-4]. 이들 부하 중 유도전동기, 컴퓨터 부하 등은 전압 외란시 직접적인 피해가 발생하지만, 고압 방전등은 갑작스런 정전으로 인하여 산업현장에서 설비 점검시 또는 스포츠 관람시 부수적인 손실이 발생하여 되어 오히려 직접적인 손실보다 크다고 할 수 있다. 이에 본 논문에서는 전압 강하가 발생시 고압 방전등에 미치는 운전한계 특성에 대하여 연구하고자 한다.

일반적으로 전압 강하에 대한 Lamp의 성능 평가 기준은 따로 규정되어 있지 않으나, 전원 전압은 정격의 92~106%의 범위에 있을 때 Lamp가 정상적으로 동작한다는 규정이 명시되어 있다.

전압 강하는 정격주파수에서 지속시간이 0.5cycle에서 1분 정도, 전압 저하의 정도가 실효치 기준으로 0.1~0.9[p.u]까지인 현상을 말하며, 본 논문에서의 Sag 발생의 크기는 0~0.9[p.u], 기간은 0.01~90[cycle]으로 하였다.

본 논문에서는 전압 강하가 발생하였을 경우 400[W] 고압 방전등에 미치는 운전한계 특성에 대하여 시뮬레이션을 통하여 분석하였다. 시뮬레이션 소프트웨어는 전력전자 분야에서 많이 사용하고 있는 PSIM(Ver. 6.0)을 이용하였으며, 결과로서 Sag 발생에 따른 Lamp의 동작특성을 CBEMA 곡선으로 나타내었다.

2. 고압 방전등

고압 방전등(High Pressure Discharge Lamp)은 고압가스나 증기 중의 방전에 의한 발광을 이용한 것으로 대표적인 것은 고압 수은램프, 메탈헬라이드 램프, 고압 나트륨램프 등을 말하며, 또한 고휘도 광원이므로 HID(High Intensity Discharge Lamp)라 한다.

그리고, 방전램프에는 전류가 증가하면 전극 간의 전압이 감소하는 성질(부특성)을 가지고 있기 때문에 램프의 점등을 지속시킬 때에는 전류를 제한할 안정기가 필요하다. 그림 1은 일반적으로 가장 많이 사용하는 초크 코일형 안정기를 나타내며, 구성은 램프를 안정하게 점등시키는 초크 코일과 램프를 시동시키는 이그나이터(시동기) 및 역률을 개선하는 역률개선용 콘덴서로 구성되어 있다.

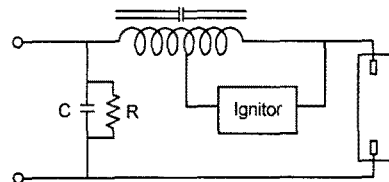


그림 1 Chocking coil 형
Fig. 1 Chocking coil type

2.1. 모델링(5)

램프의 방전 특성을 수학적으로 모델링하기 위해서는 방전 램프의 전압과 전류의 파형을 유도하여야 하며,

플라즈마에 대한 물리적인 가정이 필요하다. 방전관 내의 자유전자의 증가는 자유전자(P_e)의 생성과 전자 손실(L_e)에 의존한다. 이러한 전기적 성질은 Francis equation을 이용하여 식(1)로 나타낼 수 있다.

$$\frac{d\eta_e}{dt} = P_e + L_e \quad (1)$$

여기서, η_e 는 전자의 평균밀도이다.

플라즈마에 대한 물리적인 가정은 다음과 같다.

1) 방전관 내의 자유전자의 생성은 램프의 순시 전력($v(t)i(t)$)에 비례한다. 따라서 이것을 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$P_e = k_1 v(t)i(t) \quad (2)$$

여기서, k_1 은 상수이다.

2) 전극 손실율은 전자 밀도와 관련이 있다. 여기서는 방전관 벽 및 전자 재결합에 의한 손실의 두 가지 현상을 고려해야 한다. 이것을 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$L_e = L_w + L_R \quad (3)$$

여기서, L_w 는 전자 손실이고, L_R 는 전자 재결합 손실이다.

방전관 벽에 의한 손실(L_w)은 전자 밀도(η_e)에 비례한다고 가정하면, 전자 손실은 식(4)로 나타낼 수 있고, 전자 재결합 손실은 식(5)와 같다.

$$L_w = -k_2 \eta_e \quad (4)$$

$$L_R = -k_3 e^{k_4 \eta_e} \quad (5)$$

여기서, k_2, k_3, k_4 는 상수이다.

결과적으로 식(1)은 식(6)과 같다.

$$\frac{d\eta_e}{dt} = k_1 v(t)i(t) - k_2 \eta_e - k_3 e^{k_4 \eta_e} \quad (6)$$

3) 램프의 순시 컨덕턴스($G(t)$)는 자유 전자 밀도와 비례한다.

$$G(t) = \frac{i(t)}{v(t)} = K_3 \eta_e \Rightarrow \eta_e = \frac{G(t)}{k_3} \quad (7)$$

여기서, k_3 는 상수이다.

식(7)을 식(6)에 대입하여 정리하면

$$\frac{dG(t)}{dt} = k_3 k_1 v(t)i(t) - k_2 G(t) - k_3 k_3 e^{(k_4/k_3)G(t)} \quad (8)$$

계수를 A, B, C, D 로 나타내면 식(9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{dG(t)}{dt} = Av(t)i(t) - BG(t) - Ce^{DG(t)} \quad (9)$$

여기서, $A = k_3 k_1, B = k_2, C = k_3 k_3, D = k_4 / k_3$

계수를 구하기 위해 식(9)를 시간함수로 변형하면

$$\frac{G(t_n) - G(t_{n-1})}{t_n - t_{n-1}} = Av(t)i(t) - BG(t) - Ce^{DG(t)} \quad (10)$$

여기서, $n=1,2,3,\dots,N$ 이고, N 은 총 시간이다.

계수 A, B, C, D 는 램프의 전압과 전류의 실험치를 이용하여 계산하였고, 본 연구에서는 사용한 데이터는 순서대로 0.3, 3200, 1.5, 0.5이다.

2.2. 계산 알고리즘

램프의 입력값을 $i(t)$ 라 하고, $v(t) = i(t)/G(t)$ 를 식(9)에 대입하여 정리하면

$$\frac{dG(t)}{dt} = A \frac{i^2(t)}{G(t)} - BG(t) - Ce^{DG(t)} \quad (11)$$

양변에 $G(t)$ 를 곱하면

$$G(t) \frac{dG(t)}{dt} = Ai^2(t) - BG^2(t) - CG(t)e^{DG(t)} \quad (12)$$

$y(t) = G^2(t)$ 라 하면 $dy(t)/dt = 2G(t)dG(t)/dt$ 이기 때문에 식(12)에 대입하면 식(13)을 구할 수 있다.

$$\frac{dy(t)}{dt} = 2Ai^2(t) - 2By(t) - 2C\sqrt{y(t)}e^{D\sqrt{y(t)}} \quad (13)$$

위의 식을 적분하여 $y(t)$ 를 계산하면, $G(t) = \sqrt{y(t)}$ 이기 때문에 결과적으로 램프 컨덕턴스 $G(t)$ 와 램프 전압 $v(t)$ 를 계산할 수 있다. 램프 전류 $i(t)$ 는 다음 절의 이그나이터 회로의 전류를 사용하였다.

2.3. 시뮬레이션

그림 2는 방전램프 회로도를 나타낸다. 회로도에는 3개의 블록으로 구성되어 있다.

(1)의 블록은 이그나이터 회로이며, Sag 발생을 위한 sag.dll의 "DLL Blocks"를 포함하고 있다.

(2)의 블록은 램프 회로이며, 이그나이터의 전류 입력을 통해 구형파 램프 전압과 램프의 컨덕턴스를 출력하는 회로이다. $\phi(t)/dt$ 블록이 식(13)을 나타낸다.

(3)의 블록은 Sag 발생시 램프의 전압과 전류를 출력하는 회로이다. 램프 전압 및 전류를 출력하기 위한 vout1.dll의 "DLL Blocks"를 포함하고 있다.

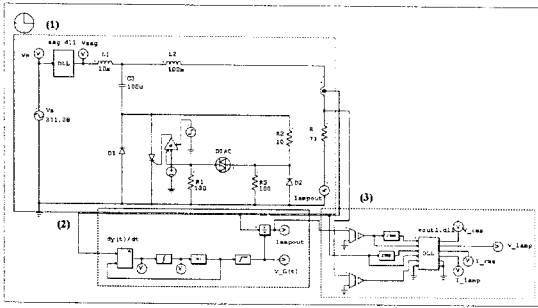
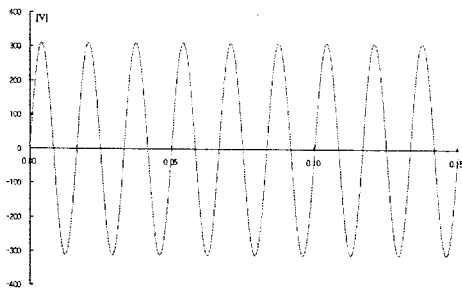


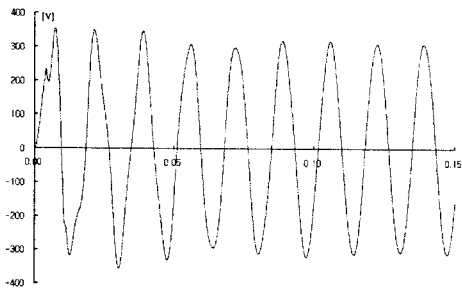
그림 2. 방전램프 회로도
Fig. 2. Circuit of the discharge lamp

2.4. 동작특성

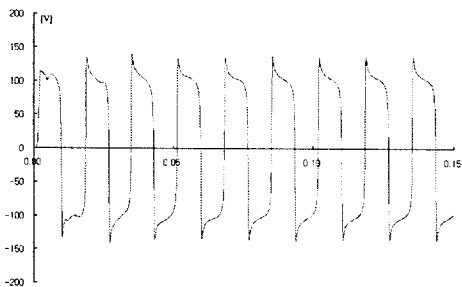
그림 3은 정격 전압 220[V]를 인가하였을 때의 방전램프의 동작 특성을 나타낸다. (b)의 이그나이터 전압 파형을 보면 초기 이그나이터 동작 후 대략 0.09초 이후에 안정화 된 것을 알 수 있다. (c)의 램프 전압은 구형파 형태로 램프의 전압 특성이 잘 나타나 있다.



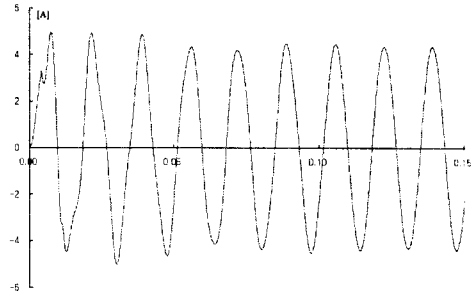
(a) 입력 전압



(b) 이그나이터 출력 전압



(c) 램프 전압



(d) 램프 전류
그림 3. 방전램프의 동작 특성
Fig. 3. The characteristics of discharge lamp

3. 전압 강하에 의한 영향 분석

방전램프 소등의 조건은 기기의 최소 동작 전압을 나타내는 MSSHIV(Minimum Steady State Hold-In Voltage)를 응용하여, MSSHIP(Minimum Steady State Hold-In Power)를 이용하였다. 램프 소등을 위한 최소 전력을 구하기 위해 실험을 통해 평균 전력을 계산하였으며, 전력을 얻기 위해 사용된 램프는 400[W] 나트륨 램프를 이용하였다.

MSSHIP를 구하기 위해 최초 220[V] 입력 전압에서 천천히 전압을 낮추면서 램프가 소등하기 직전의 전력을 구하였으며, 최종적으로 전력은 215.8[W]로 결정하였다.

Sag는 그림 2의 sag.dll 블록을 이용하여 발생시켰으며, Sag의 크기는 0~0.9[p.u], 기간은 0.01[cycle]에서 90[cycle](1.5초)이다. 그림 4는 정상상태 및 Sag 발생시 입력 전압의 파형을 나타낸다. Sag의 크기는 0.68[p.u]이고, 기간은 3[cycle]이다.

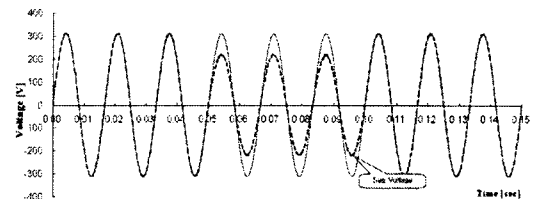
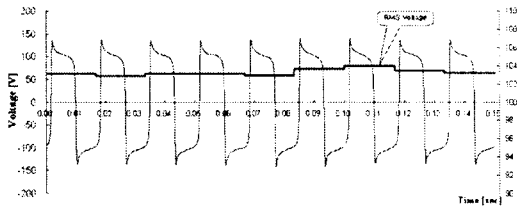
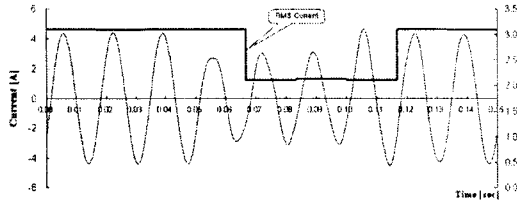


그림 4. 입력 전압 파형(정상상태-,Sag 발생시 ...)
Fig. 4. The waveform of input voltage
(without sag -,with sag ...)

그림 5의 램프 파형은 램프가 정상적으로 동작한 파형이고, Sag 발생시 전압의 크기는 0.68[p.u]이고, 기간은 3[cycle]이다. Sag 발생 기간 동안 (a)의 전압 파형은 약간 증가하였다가 다시 정상적으로 복귀하였으며, (b)의 전류 파형은 감소하였다가 다시 복귀하였다.



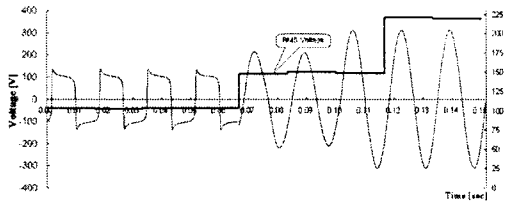
(a) 램프 전압 파형



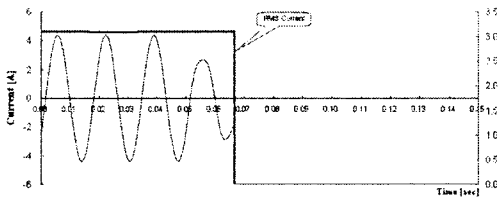
(b) 램프 전류 파형

그림 5. 램프 파형(0.8(p.u))
Fig. 5. The waveform of lamp(0.8(p.u))

그림 6은 램프가 소등되었을 때를 나타내고, Sag 발생시 전압의 크기는 0.675[p.u.]이고, 기간은 3[cycle]이다. 이때 (a)의 전압파형은 램프 소등 후 입력 전압 파형과 동일하게 정현파 형태로 나타나며, 전류값은 영(0)[A]로 나타났다.



(a) 램프 전압 파형



(b) 램프 전류 파형

그림 6. 램프 파형(0.675(p.u))
Fig. 6. The waveform of lamp(0.675(p.u))

그림 7은 400[W] 고압방전등의 시뮬레이션 결과를 CBEMA 전력만족곡선으로 나타낸 것이다. 방전램프의 소등 조건을 MSSHIP의 전력 data를 입력하였으므로 CBEMA 곡선은 선형적으로 나타났다. 최초 2[cycle]에서 소등이 되었으며, 전압 크기는 모두 0.675[p.u.]에서 소등이 되었다.

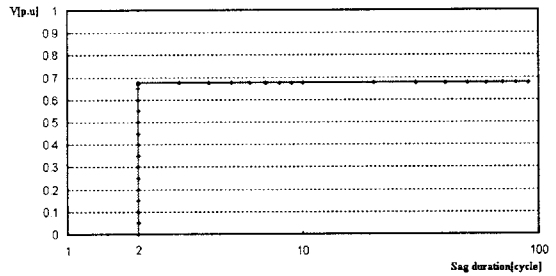


그림 7. 방전램프의 CBEMA 곡선
Fig. 7. CBEMA curve of the discharge lamp

4. 결론

고압 방전등은 전압의 외란에 매우 민감한 기기로 전압 외란 발생시 램프가 소등되어 산업 현장에서나 스포츠 경기장 등에서 갑작스런 사고를 발생하게 하는 원인이 된다.

본 논문에서는 고압 방전등을 모델링하여 전압 강하가 발생하였을 경우 방전등에 미치는 운전한계 특성에 대하여 분석하였다. 그 결과로 그림 7과 같이 Sag 발생에 따른 Lamp의 동작특성을 CBEMA 곡선으로 나타내었다.

본 연구는 2006년도 전력산업 연구개발 사업 전력 기술기초연구에 의해 이루어진 연구로서 관계부처에 감사드립니다.

참고 문헌

- [1] Gomez, J.C., Morcos, M.M, Reineri, C.A., Campetelli, G.N., "Behavior of induction motor due to voltage sags and short interruptions", Power Delivery, IEEE Trans. on, Vol. 17, Issue 2, April 2002, pp. 434-440
- [2] Djokic, S.Z., Desmet, J., Vanalme, G., Milanovic, J.V., Stockman, K., "Sensitivity of personal computers to voltage sags and short interruptions", Power Delivery, IEEE Trans. on, Vol. 20, Issue 1, Jan 2005, pp. 375-383
- [3] Dorr, D.S., Mansoor, A., Morinec, A.G., Worley, J.C., "Effects of power line voltage variations on different types of 400-W high-pressure sodium ballasts", Industry Applications, IEEE Trans. on, Vol. 33, Issue 2, March-April 1997, pp. 472-476
- [4] Pohjarheimo, P., Lehtonen, M., "Equipment sensitivity to voltage sags-test results for contactors, PCs and gas discharge lamps", Harmonics and Quality of Power, 2002. 10th International Conf. on, Vol. 2, 2002, pp. 559-564
- [5] Blanco, C., Anton, J.C., Robles, A., Ferrero, F.J., Campo, J.C., Gonzalez, M., Zissis, G., "A Discharge Lamp Model Based on Lamp Dynamic Conductance", Power Electronics, IEEE Trans. on, Vol. 22, Issue 3, Part Special Section on Lighting Applications, May 2007, pp. 727-734