

에너지 절약을 위한 형광등 대체용 더미 로드

최보환*¹, 김현재*², 여인용*¹, 김봉철*³, 임준택*¹

*¹KAIST 원자력 및 양자공학과, *²KAIST 전기 및 전자공학과, *³옵토마인드

ABSTRACT

본 논문에서 신속 점등식 안정기에 연결된 두 개의 40W 형광등 중 하나를 대체 할 수 있는 더미 로드를 제시한다. 논문에서 제안된 더미 로드는 기본과 보상회로와 고조파 보상회로로 구성된다. 본 논문에서는 제안된 더미 로드의 설계 과정과 회로의 구성을 소개하며, 실험을 통하여 그 우수성을 입증하였다.

1. 서론

도호쿠 대지진과 후쿠시마 원자력 발전소 사고 이후 일본에서는 전력부족현상[1]-[3]이 사회적으로 문제가 되면서, 각 분야에서 에너지를 절약할 수 있는 방법들이 제시되고 있다. 조명분야에서는 이등식 등기구에서 사용되는 2개의 형광등 중 하나를 제거하여 총 소비전력을 절반으로 줄이는 방식이 제시되었다. 그러나 일본에서 가장 많이 사용되고 있는 신속점등식 안정기의 특성으로 인해, 두 개의 형광등 중 하나를 떼어내면 다른 하나의 형광등까지 구동할 수 없는 문제가 발생한다. 이를 해결하기 위해 하나의 형광등을 제거한 자리를 전기적으로 대체 할 수 있는 더미 로드가 제시되었다[6]. 커패시터들로 구성된 기존의 더미 로드는 신속 점등식 안정기의 과열을 야기하는 과도한 전력소모, 과전류로 인한 남겨진 형광등의 수명 감소, 다른 전기기기 작동에 불량을 일으키는 높은 THD 등의 여러 단점을 가진다. 이러한 이유로 THD 규정의 만족, 남겨진 형광등의 정상동작, 과열로 인한 화재의 위험등을 해소 할 수 있는 새로운 더미 로드의 개발이 필요하다.

본 논문에서는 기존의 더미 로드 사용 시 발생하는 문제점들을 해결하기 위해, LC직렬 필터로 구성된 새로운 방식의 더미 로드를 제안하였다. 실험을 통하여 기존의 더미 로드와 제안된 더미 로드의 특성을 비교하여 그 제안된 더미 로드의 우수성을 입증하였다.

2. 제안된 더미 로드

신속점등식 안정기를 사용한 이등식 등기구에서 두 개의 형광등을 하나의 형광등과 하나의 더미 로드로 대체하기 위해서는 3가지 설계 조건이 필요하다. 첫째는 남겨진 형광등에 더미로드를 사용하기 전과 동일한 전압, 전류를 제공하는 것이다. 둘째는 0.9 이상의 입력 측 역률을 보장하는 것이다. 마지막으로 THD 규정을 벗어나지 않도록 입력전류의 고조파 함유율을 낮추는 것이다. 위 3가지 조건들을 만족하도록 설계한 더미 로드는 그림 1과 같이 구성된다.

2.1 더미 로드의 설계

상기 설계 조건들을 만족하는 제안된 더미 로드는 기본과 보상회로와 고조파 보상회로로 구성된다. 2개의 형광등을 사용한 신속점등식 안정기를 포함한 이등식 등기구는 그림 2와 같으며, 그림 3은 그림 2의 등가회로를 나타낸다[4], [5]. L_1 , L_2 , n 은 각각 자화 인덕턴스를 포함한 1차 측 등가 인덕턴스, 누설 인덕턴스를

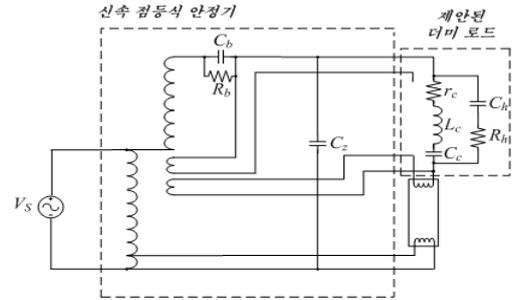


그림 1. 제안된 더미 로드를 포함하는 이등식 등기구

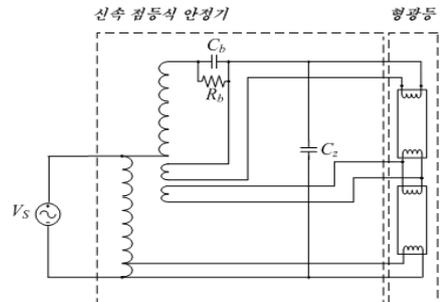


그림 2. 2개의 형광등과 연결된 이등식 등기구

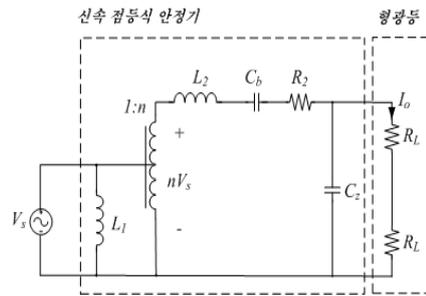


그림 3. 그림 2의 등가회로

포함하는 2차 측 등가 인덕턴스, 변압기의 권선비를 나타낸다. 하나의 형광등은 등가저항 R_L 로 나타낼 수 있으며, 신속 점등식 안정기 내부의 기생저항은 R_2 로 나타낸다. 기본과 보상회로의 설계에서 커패시터 C_c 는 충분히 작고, R_b 는 충분히 크기에 무시 가능하다.

제안된 더미 로드의 설계에는 전력소모가 작은 수동소자들이 사용되며, 기본과 보상회로는 하나의 인덕터 L_c 와 하나의 커패시터 C_c 를 포함한다. 하나의 형광등이 기본과 보상회로로 대체된 이등식 등기구의 등가회로는 그림 4와 같다. r_c 는 기본과 보상회로에 사용된 인덕터의 기생 저항 성분을 나타낸다. 그림 3의 I_o 와 그림 4의 I_L 의 기본과 성분이 동일하다면 그림 3의 형광등과 그림 4의 남겨진 형광등의 동작 조건이 동일하게 된다. 그림 4의 벡터도는 그림 5와 같다. X_2 는 그림 4의 2차 측 리액턴스이며, 벡

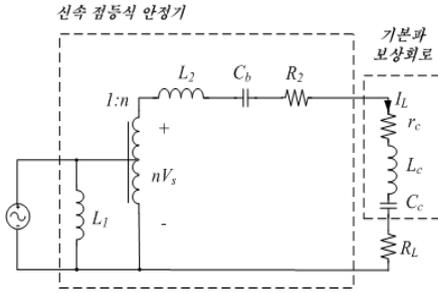


그림 4. 기본과 보상회로를 포함하는 이등식 등기구의 등가회로

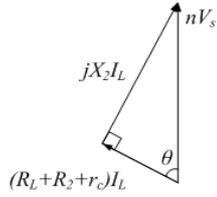


그림 5. 그림 4의 벡터도

터도를 이용하여 (5)와 같은 수식으로 나타낼 수 있다.

$$X_2 = \omega L_t - \frac{1}{\omega C_t} \quad (1)$$

$$L_t = L_2 + L_c \quad (2)$$

$$C_t = \left(\frac{1}{C_b} + \frac{1}{C_c} \right)^{-1} \quad (3)$$

$$(nV_s)^2 = I_L^2 (R_L + R_2 + r_c)^2 + I_L^2 X_2^2 \quad (4)$$

$$X_2 = \sqrt{\frac{n^2 V_s^2}{I_L^2} - (R_L + R_2 + r_c)^2} \quad (5)$$

기본과 보상회로의 L_c 와 C_c 값의 설계를 위하여, n , L_1 , L_2 가 먼저 결정되어야 한다. 권선비 n 과 인덕턴스 L_1 , L_2 는 신속 점등식 안정기의 비선형성으로 인해 입력전압과 출력전류에 따라 변화한다[4], [5]. 그림 6은 입력전압이 $100V_{rms}$ 일 때 출력 전류에 따른 n , L_1 , L_2 의 변화를 보인다. 그림 3과 같은 기존의 이등식 등기구에서 각 형광등은 약 $340mA$ 의 동작전류를 가지기 때문에, n , L_1 , L_2 를 각각 2.35, 0.65H, 0.99H로 결정할 수 있다. 이와 같이 결정된 n , L_1 , L_2 의 값과 (1)-(5)를 통해 가능한 L_c , C_c 조합들을 얻을 수 있다.

둘째 설계 조건인 입력 측 역률은 다음과 같은 수식을 통해 모든 L_c , C_c 조합들에 대하여 0.95이상의 값을 가진다.

$$p.f. = \frac{I_L \cos \theta}{\sqrt{\left(\frac{V_s}{\omega L_1} - I_L \sin \theta \right)^2 + (I_L \cos \theta)^2}} \quad (6)$$

$$\cos \theta = \frac{I_L (R_L + R_2 + r_c)}{n V_s} \quad (7)$$

$$\sin \theta = \frac{I_L X_2}{n V_s} \quad (8)$$

제품의 크기 및 생산 측면을 고려하여 기본과 보상회로의 인

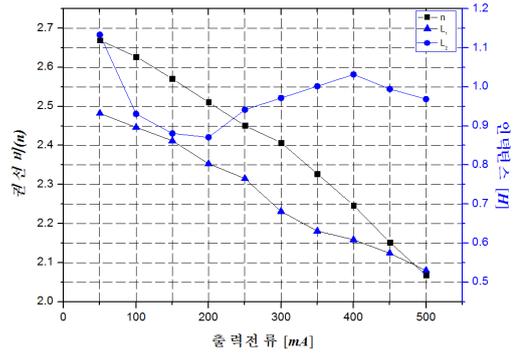


그림 6. 출력 전류에 따른 n , L_1 , L_2 의 변화

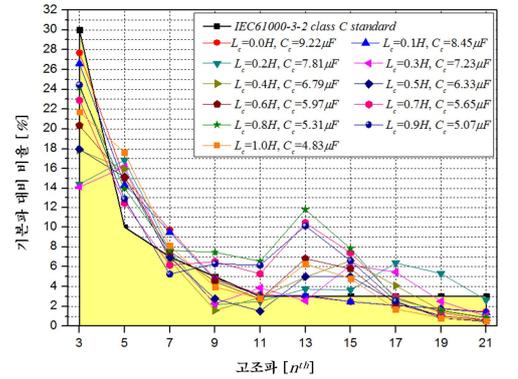


그림 7. L_c , C_c 의 조합에 따른 입력측 고조파 전류 측정 결과

덕터로 0.1-1.0H 사이의 값을 가지는 L_c 가 고려되었다. 최적의 L_c , C_c 의 조합을 찾기 위한 조건으로 셋째 설계 조건인 입력 전류의 THD가 고려되었다. 신속 점등식 안정기의 비선형적인 특성에 의하여 입력 측 고조파 전류를 분석하는 것은 어렵기 때문에 L_c , C_c 조합들에 대한 실험이 수행되었다[4], [5]. 그림 7은 상기 10개의 기본과 보상회로 조합들에 대한 THD 실험 결과로 입력 전류의 기본과 성분 대비 고조파 성분의 비율을 나타낸다. 그림 7을 통해 모든 조합의 실험 결과들이 THD 규정인 IEC61000-3-2를 초과하는 것을 확인할 수 있으며, 이를 해결하기 위한 고조파 보상회로의 설계가 필요하다.

고조파 보상회로의 설계를 위해 고려된 10개의 조합들 중 가장 낮은 THD 특성을 가지는 0.2H, 7.81 μ F의 L_c , C_c 가 선택되었다. 또한 고조파 보상회로의 설계에 있어서 220nF의 값을 가지는 신속 점등식 안정기 내부의 커패시터 C_2 가 고려되었다. 그림 8은 하나의 커패시터 C_h 와 하나의 저항 R_h 를 가지는 고조파 보상회로가 추가된 더미 로드를 가지는 이등식 등기구의 등가회로를 나타낸다. 그림 7을 통해 5차 고조파 전류가 다른 고조파 성분들에 비해 THD 규정을 상당히 초과하는 것을 확인할 수 있으며, 고조파 보상회로는 5차 고조파를 줄이는 방향으로 먼저 설계하였다.

5차 고조파 전류를 줄이기 위해 아래와 같이 표현되는 $|Z_T(j\omega)|$ 를 5차 고조파 주파수에서 증가시키는 방법이 사용되었다.

$$|Z_T(j\omega)| = \sqrt{\frac{\gamma^2 + \delta^2}{\alpha^2 + \beta^2}} \quad (9)$$

$$\alpha = \omega^4 L_c C_c (R_h + R_L) - \omega^2 \left\{ R_h \left(1 + \frac{C_c}{C_h} \right) + r_c \left(1 + \frac{C_c}{C_h} \right) + R_L C_c \left(\frac{1}{C_c} + \frac{1}{C_h} \right) \right\} \quad (10)$$

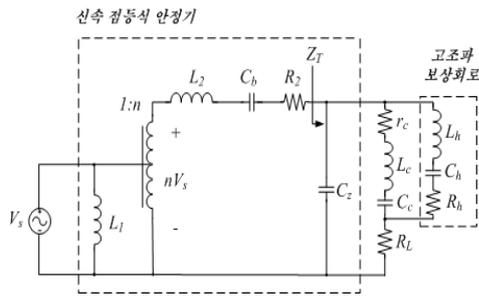


그림 8. 고조파 보상회로를 포함하는 이등식 등기구의 등가회로

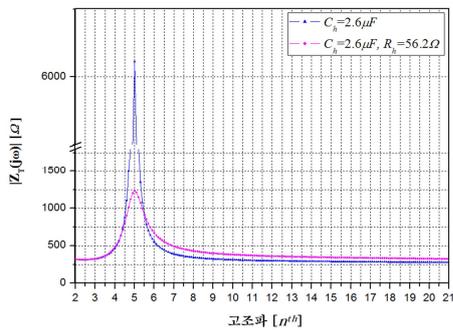


그림 9. $|Z_T(j\omega)|$ 의 주파수 특성

$$\beta = -\omega^3 \left[L_c \left(1 + \frac{C_c}{C_h} \right) + C_c (R_b (R_L + r_c) + R_L r_c) \right] + \omega \left(\frac{C_c + C_h + C_c}{C_c C_h} \right) \quad (11)$$

$$\gamma = -\omega^2 \left(\frac{L_c}{C_h} + R_b (R_L + r_c) + R_L r_c \right) + \frac{1}{C_c C_h} \quad (12)$$

$$\delta = -\omega^3 L_c (R_b + R_L) + \omega \left(\frac{R_b + R_c}{C_c} + \frac{R_c + r_c}{C_h} \right) \quad (13)$$

(9)를 통하여 5차 고조파에서 최대의 $|Z_T(j\omega)|$ 를 가지는 커패시터 C_h 의 값은 $2.6\mu F$ 으로 결정되었다. 비록 5차 고조파 전류가 C_h 에 의해 줄어들었지만, 다른 고조파 전류들은 THD 규정을 위해 배하기에 이를 감소시키기 위해 R_b 가 사용되었다. 실험을 통해 R_b 는 56.2Ω 으로 결정되었으며, $|Z_T(j\omega)|$ 의 주파수 특성은 그림 9와 같다.

3. 실험결과

신속 점등식 안정기를 포함하는 이등식 등기구에서 하나의 형광등을 제안된 더미 로드로 대체한 결과, 목표한 3가지 설계 조건들을 모두 만족하는 것을 확인하였다. 기존의 더미 로드와 제안된 더미 로드의 비교 분석을 위한 실험이 추가로 진행되었다. 제안된 더미 로드를 사용했을 때, 남겨진 형광등의 전류 I_L , 전압 V_L , 전력 P_L , 신속 점등식 안정기의 손실전력 P_b , 입력 전력 P_T , 입력 측 역률 등이 표 1에 정리되었다. 기존 더미로드 사용 시, $25.8W$ 의 전력만을 절약하는 반면에 제안된 더미 로드의 사용은 $46.4W$ 의 전력이 절약됨을 확인하였다. 또한 기존의 더미 로드의 사용은 남겨진 형광등에 과도한 전력소비를 인한 수명 감소를 야기하는데, 제안된 더미 로드는 이와 같은 문제를 해결하였다. 마지막으로, 기존의 더미로드는 THD 규정을 위배하지만, 제안된 더미 로드는 입력전류의 고조파 함유율을 줄여 THD 규정을 만족함을 그림 10을 통해 알 수 있다.

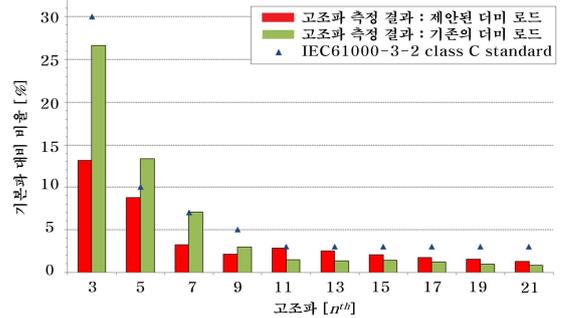


그림 10. 제안된 더미 로드와 기존의 더미로드의 입력측 고조파 전류 비교

표 1 이등식 등기구에서 하나의 형광등의 동작 조건 실험 결과

파라미터	형광등 2개 연결	하나의 형광등과 기존의 더미 로드	하나의 형광등과 제안된 더미 로드
I_L	343mA	403mA	325mA
V_L	104V _{rms}	109V _{rms}	110V _{rms}
P_L	35.8W	44.0W	35.8W
P_b	17.1W	18.9W	5.36W
P_T	88.7W	62.9W	42.3W
$p.f.$	0.94	0.99	0.99

4. 결론

본 논문에서 제안된 더미 로드는 기본과 보상회로와 고조파 보상회로를 포함하며, 기존의 더미 로드와 비교하여 우수한 성능을 가진다. 제안된 더미 로드는 기존의 더미 로드의 사용보다 약 21W의 에너지 절감을 가능하게 하며, 남겨진 형광등에 정격 전류를 공급 할 수 있게 한다. 또한 실험을 통하여 0.9이상의 역률 및 THD 규정 또한 만족함을 확인하였다. 따라서 제안된 더미 로드의 사용은 현재 일본의 시급한 전력 부족 문제에 대한 조명분야의 실질적인 에너지 절약 방법으로 활용 가능하다.

참고 문헌

- [1] Peter Fairley, "Japan Faces Post-Fukushima Power Struggle," IEEE, Spectrum, pp. 13-14, Aug. 2011.
- [2] Y. Fukushima, Y. Kikuchi, Y. Kajikawa, M. Kubota, T. Nakagaki, M. Matsukata, Y. Kato, and M. Koyama, "Tackling Power Outages in Japan : The Earthquake Compels a Swift Transformation of the Power Supply," Journal of Chemical Engineering of Japan, vol. 44, No. 6, pp. 365-369, 2011.
- [3] Fereidun Fesharaki, and Tomoko Hosoe, "The Fukushima Crisis and the Future of Japan's Power Industry," Asia Pacific Bulletin, No. 106, Apr. 2011.
- [4] C. T. Rim, B. Lee, and H. Kim, "Passive LED Driver Compatible with Rapid-start ballast," Power Electronics and ECCE Asia, pp. 507-514, May. 2011.
- [5] B. Lee, H. J. Kim, and C. T. Rim, "Robust Passive LED Driver Compatible with Conventional Rapid-Start Ballast," IEEE Trans. on Power Electronics
- [6] H. Shigemi, K. Shinobu, and H. Masaru, "Dummy Tube and Two-tube Series Sequentially Starting Fluorescent Lamp," Japan Patent, appl. no. 2006-012745, patent pending