

LCpCs 공진 탱크를 이용한 방전등용 전자식 안정기의 감도특성 해석

Sensitivity Analysis of The Electronic Ballasts with The LCpCs-type Resonant Tank for The Discharge Lamps

박 중 연* 최 현 희**
Park, Chong-yeon Choe, Hyeon-hui

Abstract

This paper studied the sensitivity characteries of the electronic ballast for the discharge lamps, which implies variation ratio of the output power by the passive element variation. We have derived the equation to represent the lamp power, and obtained the sensitivity characteristic equations. The simulation result shows that the proposed equations are correct and very useful to design the electronic ballast with the LCpCs-type resonant tank.

키워드 : 감도, LCpCs 공진탱크 인버터, 전자식 안정기

Keywords : Sensitivity, LCpCs-type resonant tank Inverter, Electronic ballasts

1. 서론

고압 방전등으로서 베탈 할라이드 램프는 다른 광원에 비해 높은 연색성 및 색온도, 고온 분광 스펙트럼 분포를 가지고 있다.[1] 이러한 램프 특성은 태양광과 비슷한 특성을 보이는 것으로 여러 광원 중에 가장 각광받고 있는 추세이다. 또한 높은 출력을 가지는 램프가 개발되면서 육내 조명뿐만 아니라 야외 조명으로써 그 수요는 더욱 증가하고 있다. 이에 따라 베탈 할라이드 램프를 제어하기 위한 안정기의 수요가 증가 하고 있는데 현재 인덕터의 전류 제어 원리를 이용한 자기식 안정기가 널리 쓰이고 있다. 자기식 안정기는 설계 및 제조가 쉽고 대부분 수동 소자로만 구성 되어 있어 신뢰도가 높지만 전자식 안정기에 비해 에너지 절감 및 고효율 시스템 측면에서 비교할 때 매우 안 좋은 특성을 가진다. 따라서 램프 제조사들은 베탈

할라이드 램프를 위한 고효율 전자식 안정기 개발에 역량을 집중하고 있다.

전자식 안정기는 일반적으로 역률 개선 회로인 PFC(Power Factor Collector), 전력 제어를 위한 Buck Converter 그리고 램프에 AC 전력을 공급하기 위한 Inverter의 3 가지 시스템으로 구성되어 있다.[2] 높은 역률과 효율, 낮은 전류THD(Total Harmonic Distortion)를 가지는 전자식 안정기는 일반적으로 2가지 원인에 의해 신뢰도가 낮아진다. 첫 번째로는 초기 램프 점등(이그니션)시 과도한 점등전류로 인한 반도체 스위치의 파괴이고 두 번째로는 제조시 각 회로에 쓰이는 수동 소자의 오차로 인한 정격 전력의 변화이다.[3][4]

본 논문은 전자식 안정기를 구성하는 3가지 시스템 중 LCpCs 공진 타입 Half-Bridge Inverter를 설계하고 설계된 LCpCs 공진 회로의 각 구성 소자에 대한 램프 출력 전력의 감도를 비교 하고자 한다.

* 강원대학교 전기전자공학전공 교수, 공학박사, 교신저자

** 강원대학교 전기전자전공 석사과정

2. 감도의 정의

감도는 변수 x 의 변화율에 대한 출력 값 H 의

변화율로 다음과 같이 정의된다.

$$S_r^H = \frac{\frac{\Delta H}{H}}{\frac{\Delta x}{x}} = \frac{x}{H} \cdot \frac{\Delta H}{\Delta x} \cong \frac{x}{H} \cdot \frac{\partial H}{\partial x} \quad (1)$$

감도는 시스템의 안정도 판별의 한 분야로서 증폭기, 송수신기의 특성 분석에 유용하게 쓰이고 있다. 입력에 대해 예민한 출력 변화를 기대하는 시스템에서는 감도가 높을수록 좋으나 본 연구에 쓰인 안정기와 같은 시스템은 각 소자의 변화에 따른 감도가 낮아야 좋은 시스템으로 판단할 수 있다. 따라서 일정한 출력을 가지는 전자식 안정기의 설계를 위해 전체 시스템은 낮은 감도 특성을 가지도록 설계를 하여야 한다.

3. Half-Bridge Inverter 설계

LCpCs 공진 타입 Half-Bridge Inverter의 설계는 다음의 가정에 의해 이루어진다. Half-Bridge 인버터의 입력 전압은 400V의 DC 전압이다. 또한 램프의 정상상태 등가 임피던스는 순수 저항(60Ω)을 가지는 것으로 가정한다.[5] 위와 같은 가정을 바탕으로 150W 세라믹 베탈 할라이드 램프용 인버터를 설계한다.

3.1 용어 정의

V_{dc} : 인버터 입력 DC 전압

$V_{rms} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} V_{dc}$: V_{dc} 의 기본파 성분과 2차 고조파 성분

R_{Lamp} : 램프 등가 저항

C_S : 직렬 커패시터

C_P : 병렬 커패시터

$\alpha = \frac{C_S}{C_P}$: 병렬 커패시터에 대한 직렬 커패시터 비

w : 구동 각주파수

$w_p = \frac{1}{\sqrt{LC_P}}$: 이그니션 전의 공진 각 주파수

$k = \frac{w}{w_p}$: 이그니션 전의 공진주파수에 대한 정상상태 구동주파수 비

3.2 램프에 대한 전력식

LCpCs 공진 타입 Half Bridge Inverter의 구조는 그림 1과 같다. Boost converter를 이용한 고효율 Power factor collector의 출력 DC 전압은 인버터의 입력 전압이 되고 2개의 MosFET를 이용하여 LCpCs 공진 회로에 0V에서 400V의 구형파 전압을 인가하게 된다. 램프의 등가 임피던스를 저항

성분인 60Ω으로 가정한 것은 실제 LCpCs 공진 회로에서 램프의 전력은 모두 램프 등가 저항인 R_{Lamp} 에서 소비되는 것을 전제로 한 것이다.

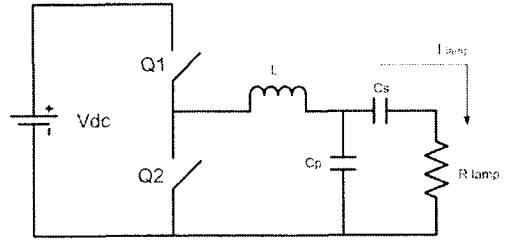


그림 1 LCpCs 공진 타입 Half-Bridge Inverter 구조

램프에 흐르는 전류에 대한 수식은 다음과 같이 표현 된다.

$$I_{Lamp} = \frac{V_{rms} C_S w}{\sqrt{[1 - k^2(\alpha + 1)]^2 + [R_{Lamp} C_S w(1 - k^2)]^2}} \quad (2)$$

여기서 V_{rms} 는 LCpCs 공진 회로에 입력되는 0V에서 400V의 구형파 전압의 기본파 성분과 2차 고조파 성분에 대한 실효값이다. 이는 구형파의 기본파 성분만 램프의 출력을 결정한다는 것을 가정한 것이다. k 는 이그니션 전의 공진 주파수에 대한 스위칭 주파수의 비로서 인버터 설계 시 스위칭 주파수와 이그니션 주파수의 비를 k 라는 상수항으로 표현 하였다. 저항 R_{Lamp} 에 대한 전력은 $P = I^2 R_{Lamp}$ 이므로 램프의 출력 전력 식은 다음과 같이 표현된다.

$$P_{Lamp} = \frac{(C_S w V_{rms})^2 R_{Lamp}}{[1 - k^2(\alpha + 1)]^2 + [R_{Lamp} C_S w(1 - k^2)]^2} \quad (3)$$

식 (3)을 가지고 R_{Lamp} , k , V_{rms} , w , w_p 는 상수로 C_S , α 는 변수로 두어 150W의 정 출력을 가지는 LCpCs값을 설계한다.

3.3 램프 구동 원리

본 논문에서 쓰이는 전자식 안정기의 램프 점등 원리는 다음과 같다. 아크가 형성되기 전의 램프 등가 저항은 무한대($R = \infty$)이다. 바이어스 전압이 인버터 드라이버 IC에 인가되면 Inverter의 스위칭 주파수는 250kHz에서 정상 동작 주파수인 25kHz까지 떨어진다. 점등 전 램프의 등가 저항은 무한대이므로 램프에는 LCpCs 공진 전압 이득 곡선을 따라서 주파수가 낮아짐에 큰 전압이 인가된다. 이그니션 주파수는 약 200kHz로 매우 높기 때문에 주파수에 선형적인 임피던스를 가지는 L에 의해

초기 램프의 인입전류를 제한할 수 있으므로 스위칭 소자의 신뢰도를 높일 수 있다. 램프의 점등 과정을 그림 2에 설명하였다. 점등 전 램프양단 전압은 무한대 임피던스로 높은 Q값을 가지는 전압이득 곡선을 가진다. 초기 스위치를 높은 주파수에서 구동시켜 시간에 따라 주파수를 1에서 2로 변화하게 되어 이그니션 전압에 도달하게 되면 램프는 점등되고 무한대의 임피던스는 유한한 값을 가지는 임피던스로 변하게 된다. 이에 따라 램프 양단 전압이득 곡선은 변하게 되고 주파수는 정상동작 주파수인 4로 될 때까지 낮아지게 된다.

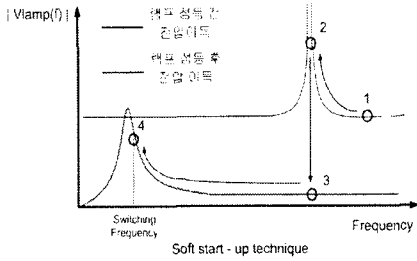


그림 2 Soft Start-up Technique

4. 각 파라미터에 대한 감도의 적용

LCpCs 공진 타입 Half-Bridge Inverter에 쓰이는 각 파라미터 중 V_{rms} , R_{Lamp} , L , C_S , C_P 에 대한 램프 출력 P 의 감도를 식 (3)을 이용하여 표현하였다.

4.1 $S_{V_{rms}}^P$: V_{rms} 에 대한 감도

$$S_{V_{rms}}^P = \frac{V_{rms}}{P_{Lamp}} \times \frac{\partial P_{Lamp}}{\partial V_{rms}} \quad (4)$$

$$\frac{V_{rms}}{P_{Lamp}} = \frac{[1-k^2(\alpha+1)]^2 + [R_{Lamp} C_S w (1-k^2)]^2}{R_{Lamp} (C_S w V_{rms})^2} V_{rms} \quad (5)$$

$$\frac{\partial P_{Lamp}}{\partial V_{rms}} = \frac{2R_{Lamp} V_{rms} (C_S w)^2}{[1-k^2(\alpha+1)]^2 + [R_{Lamp} C_S w (1-k^2)]^2} \quad (6)$$

$$S_{V_{rms}}^P = 2 \quad (7)$$

4.2 $S_{R_{Lamp}}^P$: R_{Lamp} 에 대한 감도

$$\frac{\partial P}{\partial C_S} = \frac{2R_{Lamp} C_S w V_{rms}^2 \left\{ [1-k^2(\frac{C_S}{C_P}+1)]^2 + [R_{Lamp} C_S w (1-k^2)]^2 \right\} - C_S^2 R_{Lamp} [w V_{rms}]^2 \left\{ -2\frac{k^2}{C_P} [1-k^2(\frac{C_S}{C_P}+1)] + 2C_S [R_{Lamp} w (1-k^2)]^2 \right\}}{\left\{ [1-k^2(\frac{C_S}{C_P}+1)]^2 + [R_{Lamp} C_S w (1-k^2)]^2 \right\}^2} \quad (18)$$

$$S_{R_{Lamp}}^P = \frac{R_{Lamp}}{P_{Lamp}} \times \frac{\partial P_{Lamp}}{\partial R_{Lamp}} \quad (8)$$

$$\frac{R_{Lamp}}{P_{Lamp}} = \frac{[1-k^2(\alpha+1)]^2 + [R_{Lamp} C_S w (1-k^2)]^2}{[C_S w V_{rms}]^2} \quad (9)$$

$$\frac{\partial P_{Lamp}}{\partial R_{Lamp}} = \frac{[C_S w V_{rms}]^2 [1-k^2(\alpha+1)]^2 - R_{Lamp}^2 [C_S w (1-k^2)]^2}{\left\{ [1-k^2(\alpha+1)]^2 + R_{Lamp}^2 [C_S w (1-k^2)]^2 \right\}^2} \quad (10)$$

$$S_{R_{Lamp}}^P = \frac{[1-k^2(\alpha+1)]^2 - [R_{Lamp} C_S w (1-k^2)]^2}{[1-k^2(\alpha+1)]^2 + [R_{Lamp} C_S w (1-k^2)]^2} \quad (11)$$

4.3 S_L^P : L 에 대한 감도

$$S_L^P = \frac{L}{P_{Lamp}} \times \frac{\partial P_{Lamp}}{\partial L} \quad (12)$$

$$\frac{L}{P_{Lamp}} = \frac{[1-k^2(C_S w_P^2 L + 1)]^2 + [R_{Lamp} C_S w_P k (1-k^2)]^2}{R_{Lamp} [C_S w_P k V_{rms}]^2} L \quad (13)$$

$$\frac{\partial P_{Lamp}}{\partial L} = \frac{2R_{Lamp} [C_S w_P k V_{rms}]^2 [1-k^2(C_S w_P^2 L + 1)] [k^2 C_S w_P^2]}{\left\{ [1-k^2(C_S w_P^2 L + 1)]^2 + [R_{Lamp} C_S w_P k (1-k^2)]^2 \right\}^2} \quad (14)$$

$$S_L^P = \frac{2LC_S w_P^2 k^2 [1-k^2(C_S w_P^2 L + 1)]}{[1-k^2(C_S w_P^2 L + 1)]^2 + [R_{Lamp} C_S w_P k (1-k^2)]^2} \quad (15)$$

4.4 $S_{C_S}^P$: C_S 에 대한 감도

$$S_{C_S}^P = \frac{C_S}{P_{Lamp}} \times \frac{\partial P_{Lamp}}{\partial C_S} \quad (16)$$

$$\frac{C_S}{P_{Lamp}} = \frac{[1-k^2(\frac{C_S}{C_P}+1)]^2 + [R_{Lamp} C_S w (1-k^2)]^2}{R_{Lamp} [C_S w V_{rms}]^2} C_S \quad (17)$$

$$S_{C_S}^P = \frac{2[1-k^2(\frac{C_S}{C_P}+1)][1-k^2]}{[1-k^2(\frac{C_S}{C_P}+1)]^2 + [R_{Lamp} C_S w_P k (1-k^2)]^2} \quad (19)$$

4.5 $S_{C_p}^P$: C_p 에 대한 감도

$$S_{C_p}^P = \frac{C_p}{P_{Lamp}} \times \frac{\partial P_{Lamp}}{\partial C_p} \quad (20)$$

$$\frac{C_s}{P_{Lamp}} = \frac{[1-k^2(\alpha+1)]^2 + [R_{Lamp}\alpha C_p w(1-k^2)]^2}{R_{Lamp}[\alpha C_p w V_{rms}]^2} C_p \quad (21)$$

$$\frac{\partial P_{Lamp}}{\partial C_p} = \frac{2R_{Lamp}C_p[\alpha w V_{rms}]^2[1-k^2(\alpha+1)][1-k^2(2\alpha+1)]}{\{[1-k^2(\alpha+1)]^2 + [R_{Lamp}\alpha C_p w(1-k^2)]^2\}} \quad (22)$$

$$S_{C_p}^P = \frac{2[1-k^2(\alpha+1)][1-k^2(2\alpha+1)]}{[1-k^2(\alpha+1)]^2 + [R_{Lamp}\alpha C_p w_p k(1-k^2)]^2} \quad (23)$$

5. LCpCs 공진 타입 Half-Bridge Inverter 의 감도 특성 비교

램프의 등가 임피던스는 60Ω 으로 가정하였고 인버터의 스위칭 주파수는 25kHz, 이그니션시 공진 주파수는 180kHz로 가정하고 임의의 각 L, Cp, Cs값이 다른 3종류의 공진 탱크를 설계 하였다.

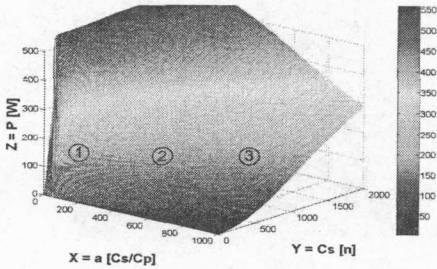


그림 4 a와 C_s 에 따른 램프 전력

식 (3)을 이용하여 a와 C_s 에 따른 램프 전력을 3차원 그래프로 표현하였다. X축은 a, Y축은 C_s , Z축은 램프 전력 P이다. 위의 각 설계 값에 대응되는 L, Cs, Cp의 값을 표 1에 나타내었다.

표 1 LCpCs 설계값

Point	①	②	③
X	165	510	825
Y	146×10^{-9}	591×10^{-9}	996×10^{-9}
Z	148.1	150.9	150.9
L	888 uH	679 uH	651 uH
C_s	146 nF	591 nF	996 nF
C_p	0.88 nF	1.15 nF	1.2 nF

3가지 LCpCs공진 탱크의 단위 전압 이득은 25kHz에서 동일한 값을 가지는 것을 P-Spice시뮬레이션을 통해 확인 할 수 있다.

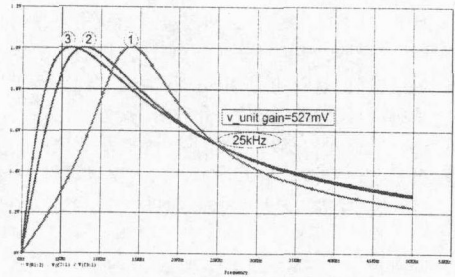


그림 5 LCC 공진 회로의 전압이득

설계된 LCpCs공진 회로를 R_{Lamp} , L, C_s , C_p 에 대한 전력 P의 감도를 그래프로 표현하였다. $S_{V_{rms}}^P$ 는 항상 2 이므로 제외하였다.

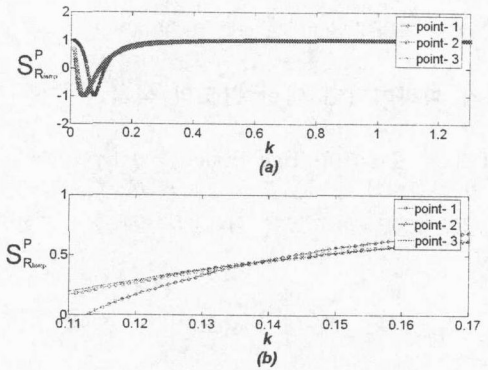


그림 6 R_{Lamp} 에 의한 전력 P의 Sensitivity

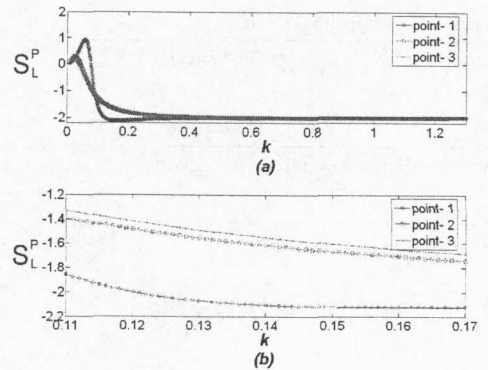


그림 7 L에 의한 전력 P의 Sensitivity

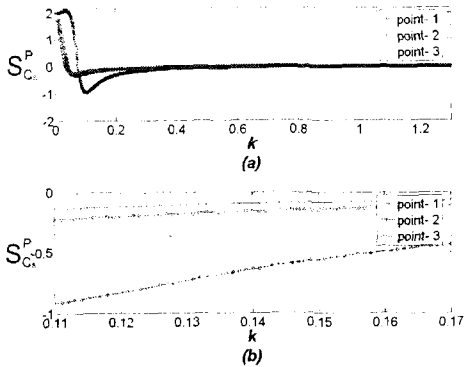


그림 8 C_s 에 의한 전력 P의 Sensitivity

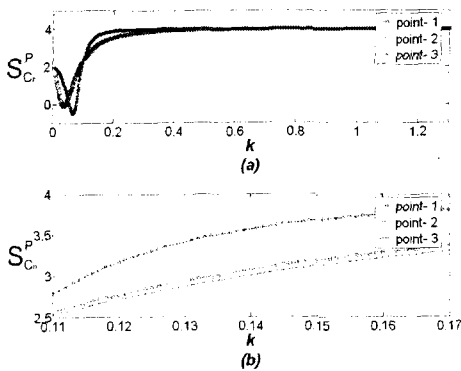


그림 9 C_p 에 의한 전력 P의 Sensitivity

그림 6은 식(11)에 대해, 그림 7은 식(15)에 대해 그림 8은 식(19)에 대해, 그림 9는 식(23)에 대해 각각 그래프로 표현한 것이다. 실제 시 조건을 w 는 $2\pi 25 \times 10^3$, w_p 는 $2\pi 180 \times 10^3$ 로 하였으므로 램프점등 전의 LCpCs공진주파수에 대한 램프 점등 후 동작 주파수 비 k 는 0.138이 된다. 그림 6, 7, 8, 9의 각 (b)는 동작 주파수($k=0.138$)를 기준으로 확대해서 표현한 것이다. 각 L, Cp, Cs에 대한 전력의 감도는 단위 주파수 k 에 따라 변하지만 설계값 3가지 경우에 있어서 Cs와 Cp의 비(a)를 크게 설계 할수록(Point ③) 다른 설계값에 비해 낮아지는 것을 그래프를 통해 확인 할 수 있다. 즉 LCpCs를 이용한 Half-Bridge Inverter를 설계 할 경우 Cs와 Cp의 비율을 크게 설계하면 각 소자값의 오차에 의한 램프 전력의 변화가 적어진다

6. 결론

정상 상태에서 램프를 등가 저항 60Ω 로 가정한 램프의 전력식을 이용하여 임의의 3가지 LCpCs설

계에 대한 감도를 표현한 결과 a와 C_s 가 큰 값을 가질수록 전력의 감도 특성이 낮은 LCpCs를 설계 할 수 있음을 확인하였다. 이는 램프의 이그니션 주파수와 정상 동작 주파수를 멀어지게 설계할수록 낮은 전력 감도를 가지는 LCpCs 공진 타입 Half-Bridge Inverter 구조의 전자식 안정기를 설계 할 수 있음을 의미한다. 따라서 전자식 안정기 회로에 쓰이는 각 소자의 오차 및 램프의 점등 시간에 따른 등가 저항의 변화에 의한 램프 출력의 변화를 상대적으로 감소시킬 수 있다.

본 논문은 제조 공정상 어쩔수 없이 나타나는 각 소자의 오차에 의한 안정기 출력 전력의 변화를 최소화할 수 있는 LCpCs 설계 방법을 제안 하였다. 이는 Half-Bridge Inverter를 사용하는 전자식 안정기를 설계할 때 좋은 참고 사항이 될 수 있을 것으로 판단된다. 하지만 본 연구 내용은 램프가 이미 점등된 정상상태에서만 고려한 것이다. 따라서 전자식 안정기의 주된 파손 원인인 램프 점등시의 인입 전류를 제한 할 수 있는 설계 방법을 연구하는 것이 앞으로의 진행 과제이다.

참고 문헌

- [1] Wei Yan, Y. K. E. Ho, S. and Y. R. Hui, "Stability Study and Control Methods for Small-Wattage High-Intensity-Discharge (HID)Lamps", *IEEE Trans, Ind, Application*, vol37, No.5, p1522-1530, 2001.
- [2] Dong-Youl Jung and Chong-Yeon Park, "The Development of the Buck Type Electronic Dimming Ballast for 250W MHL", *Journal of Electrical Engineering & Technology*, Vol. 1, No. 4, pp. 496~502, 2006.
- [3] Christian Brañas, Francisco J. Azcondo and Salvador Bracho, "Contributions to the Design and Control of LCsCp Resonant Inverters to Drive High-Power HPS Lamps", *IEEE TRANS. IND., VOL. 47, NO. 4*, pp796-808, 2000.
- [4] 임병노, 강목순, 임기승, 박종연, "시동전류 제한을 통한 메탈할라이드 램프용 안정기의 최적 설계", *대한전기학회 논문집*, Vol 57, No 3, pp 409-414, 2008.
- [5] Christian Brañas, Francisco J. Azcondo and alvador Bracho, "Design of LCpCs Resonant Inverters as a Power source for HID Lamp Ballast Applications", *IEEE TRANS. IND. Application* Vol. 41, NO. 6, pp 1584-1593 , 2005.