

메탈할라이드 램프용 조도제어형 자기식 안정기의 최적 설계 방법

A Optimal Design method for Dimmable Magnetic Ballast Design for Metal Halide Lamps

박 종 연* 이 현 진**
Park, Chong-Yeon Lee, Hyeon-Jin

Abstract

The inductor which is used at low frequency as the main part of magnetic ballast consists of an iron core, a bobbin and coil. The conventional inductor design method is not suitable for the magnetic ballast because it has various variables and is not a unique method for the magnetic ballast.

Thus, this paper presents the optimal design method for a lamination type inductor using a magnetic ballast for Metal Halide Lamps. Also, the optimal inductor design method is researched for inductors of dimming ballasts and ignitors that have a gate-triggered structure using a SCR thyristor. By the simulation and experimental results, we showed that the proposed design methods is valid.

키워드 : 자기식 안정기, 인덕터, 이그나이터, 조도제어
Keywords : magnetic ballast, inductor, ignitor, dimming

1. 서론

사회의 발전과 성장에 따라 에너지의 사용이 급증하는 추세이며, 에너지를 절약하고자 하는 움직임이 일고 있다. 현재 램프의 점등만을 목표로 하는 안정기 제품들에도 이러한 추세가 반영되어 조도제어 및 램프전력 조절이 가능한 안정기들이 시장을 형성하고 있다. 기존 전자식 안정기에도 이러한 서비스를 제공하는 제품을 요구하지만 방전램프의 부성저항 특성과 음향공명현상 등으로 인하여 상품화의 신뢰성 확보가 어렵다. 이러한 문제들을 회피하는 방법으로 저주파로 구동되는 자기식

안정기가 대안이 될 수 있다. 자기식 안정기는 전자식 안정기에 비해 매우 간단한 구조로 되어 있기 때문에 안정기 제품의 신뢰성을 높일 수 있으며, 생산단가를 낮출 수 있는 장점을 갖는다. 이러한 장점을 갖는 자기식 안정기에 조도제어 기능을 더하여 보다 나은 서비스를 제공할 수 있으므로 사용빈도 또한 높다. 이에 따라 자기식 안정기의 주요 부품인 저주파용 인덕터의 최적설계방법이 필요하다.[2][3][7] 저주파용 인덕터는 주로 철심코어를 주재료로 하여 만들어 지는데 기존의 설계방법은 참고문헌 [1]을 기반으로 하였다. 그러나 이 방법은 여러 개의 변수가 너무 많아서 현재 사용되는 규격과 일치하지 않으므로 국내에서 설계 및 제작하기에 적합하지 않다. 인덕터의 설계방법을 현재에 맞게 수정 및 보완할 필요가 있다. 따라서 본 논문에서는 메탈할라이드 램프용 자기식 안정기에 사용되는 철심코어형 인덕터의 설계 방법을 나타내었다. 또한 조도제어에 사용되는 인덕터의

* 강원대학교 IT대학 전기전자공학부 교수, 교신저자

** 강원대학교 IT대학 전기전자공학부 학부 과정

권선 설계와 자주 사용되는 SCR의 게이트트리거 구조를 갖는 이그나이터의 최적 설계 방법을 제시하였으며, 시뮬레이션과 실험을 통하여 본 논문에서 설명한 설계방법의 타당성을 입증하였다.

2. 본론

본론에서는 250W 메탈헬라이드램프용 조도제어형 자기식 안정기의 원리와 안정기의 설계 방법을 구체적으로 설명하였다. 또한 램프의 등가모델링을 통한 조도제어용 권선의 설계와 이그나이터의 설계를 하였다. 마지막으로 시뮬레이션과 실험을 통하여 제안한 설계 방법의 타당성을 입증하였다.

2.1 조도제어형 자기식 안정기의 원리

참고문헌 [4]에서 제안한 조도제어형 자기식 안정기의 구조는 그림 1과 같다. 회로에는 실질적인 램프전류제한 요소인 단권인덕터 외에 HID 램프의 점등을 위한 점등회로가 사용되며, 3개의 릴레이는 램프의 3단계 조도제어 상태를 위해 사용된다. 그리고 각각의 릴레이의 스위칭을 위해 MCU(Micro Controller Unit)가 사용되며, 영전류스위칭을 위한 Zero Current Sensing 회로가 추가되었다.

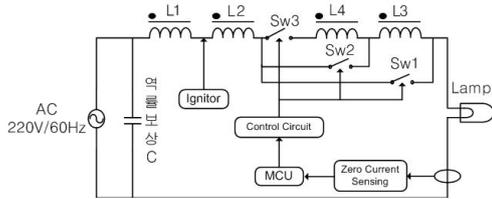


그림 1 조도제어형 자기식 안정기의 구조

램프의 점등과정은 다음과 같다. 램프의 점등을 위해서는 Sw1이 턴온하게 되며, 점등회로 회로가 동작하여 단권변압기의 형태인 L1과 L2에 의해 램프 양단에 고전압이 발생하게 된다. 점등 후, 램프 정상상태가 되면, Sw1~Sw3의 구동 여부에 따라 램프의 조도를 제어하게 된다. 즉, 자기식 안정기의 인덕턴스 변화를 통해서 램프에 공급되는 전력을 제어한다. 여기서 인덕터는 한 코어에 감겨져 있으며, 결합된 상호 인덕턴스 때문에 적은 권선수로도 큰 인덕턴스를 유도하게 된다.[4]

원하는 조도상태에 따라 각 Sw(릴레이)를 구동시키려면 코일양단에 일정값 이상의 DC전압을 가해주어야 하는데 이 값은 MCU의 전압레벨보다 큰 값이므로 MCU의 출력핀과 기계식 릴레이 사이에 Control Circuit이 필요하다. ZCS를 위한 램프의 영전류 검출은 Current Transformer를 사용하였다. Zero Current Sensing 회로는 램프의 영전류 지점을 검출하여 MCU에 전달하도록 구성하였다.

전류의 양을 고려하지 않은 스위칭을 하면 스위치 양단에 필요이상의 전압으로 스위치의 파손 또는 수명감소현상을 유발시킨다. 따라서 안정기(L) 전류의 양이 가장 적은 지점에서 스위칭이 이루어져야 한다.

2.2 메탈헬라이드램프의 등가모델링

안정기를 설계하기 위해서는 메탈헬라이드 램프의 전력에 따른 등가 임피던스와 아크가 유지될 수 있는 최소 전력을 구해야 한다.[6] 그림 2는 기존의 자기식 안정기로 램프를 점등 후 입력 전압을 가변하여 램프의 최대 임피던스를 구하였다. 실험에 사용된 램프는 250W 메탈헬라이드램프를 사용하였다. 램프의 등가 임피던스는 전력의 함수로 식(1)과 같이 구할 수 있다.

$$|Z(p)| = \frac{v^2(p)}{p} \quad (1)$$

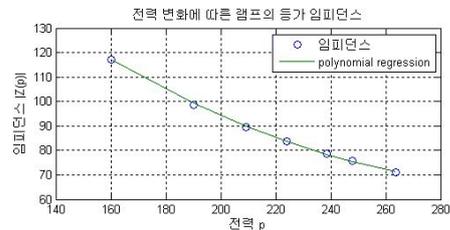


그림 2 전력에 대한 250W 메탈헬라이드 램프의 임피던스

그림 2에서 램프의 입력전력이 증가할수록 램프의 등가임피던스가 감소하는 것을 알 수 있으며, 등가임피던스 $|Z(p)|$ 를 램프전력에 의한 다항식으로 표현하면 식(2)과 같이 얻을 수 있다.

$$|Z(p)| = 0.022p^2 - 1.3505p + 269.304 \quad (2)$$

2.3 자기식 안정기의 인덕터 설계

조도제어형 자기식 안정기의 인덕터는 철심코어를 주재료로 하여 제작한다. 자기식 안정기는 50Hz/60Hz의 저주파로 동작하는데, 페라이트코어로는 효율이 낮아 사용할 수 없기 때문이다.[5]

인덕터의 설계는 본 절의 (1)~(17)의 단계별로 시행하면 된다. 단, 수치대입은 MKS 단위를 고려한 식이기 때문에 이 논문에서 명시하는 동일한 단위의 값을 대입해야 한다. 또한 본 논문에서 제시하는 인덕터 설계방법은 그림 3과 같이 EI-적층 구조에 한정된 설계방법이므로 코어의 형태가 다를 때에는 몇 가지 상수를 바꾸어 계산해야 한다.

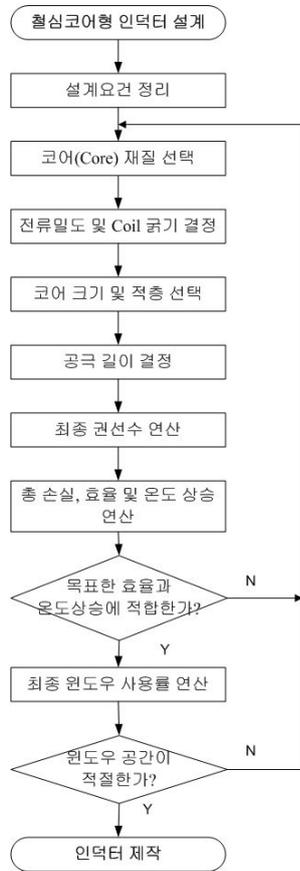


그림 3 철심코어형 인덕터 설계 방법

- (1) 설계에 필요한 요건을 정리한다.
- ① V_L : L 양단에 걸리는 전압의 rms값
 - ② I_L : L에 흐르는 전류의 rms값
 - ③ f_L : 기본파의 주파수
 - ④ K_u (윈도우 사용률) : 윈도우 사용률이 0.5이상 되면 이상적으로 코일을 감더라도 윈도우의 넓이를 넘어서게 된다.
 - ⑤ K_f (Waveform factor) : 구형파일 때 $K_f=4.0$, 정현파일 때 $K_f=4.4$ 이다.
 - ⑥ J (전류밀도) : AWG(American Wire Gauge) table를 참조하여 3식에서 $J \cong 300[A/cm^2]$ 이 되도록 Coil을 선택한다. 이 때, 손실과 가격의 절충이 이루어지기 때문이다.[1]

$$J = \frac{I_L}{A_{wire}} [A/cm^2] \quad (3)$$

- ⑦ 자성재료 : 용도와 손실량을 감안해서 재질을 결정한다.[5]
- (2) B_{ac} (자속밀도), μ_m (투자율) 결정에 따른 코어

크기 및 적층을 선택한다.

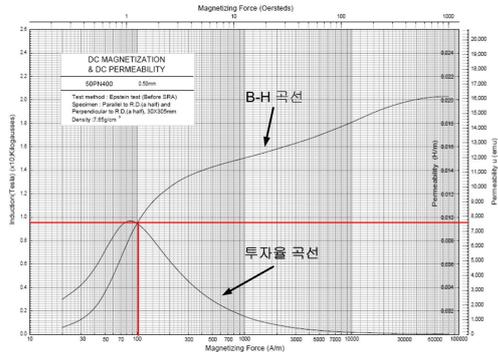


그림 4 50PN400의 B-H 특성곡선 및 투자율 곡선

- ① 결정한 철심재료의 B-H 특성곡선 그림 4에서 최종 권선수를 적게 하기 위해서 투자율이 가장 높은 지점에서 A_p (Area Product)를 구하여 코어의 크기 및 적층을 선택한다.

$$A_p = \frac{VI \cdot 10^4}{K_f K_u f J B_m} [cm^4] \quad (4)$$

A_p 를 만족하는 코어 중에 W_a/A_c 의 비율이 가장 작은 것을 선택하면 가장 작은 코어를 선택하게 된다.

- ② 코어 크기 및 적층에 따른 변수들의 정리
그림 5는 EI-적층 코어의 주요변수로 사용되는 각 길이 및 넓이를 도식화한 것이다.

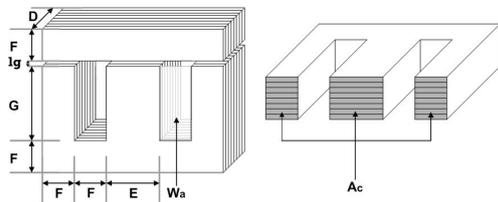


그림 5 E and I, Laminations

$$W_a = F \times G [cm^2] \quad (5)$$

$$A_c = D(E+2F) \times \text{점적률} [cm^2] \quad (6)$$

$$A_p = A_c \times W_a [cm^4] \quad (7)$$

$$MLT = 2(D+E+2F) [cm] \quad (8)$$

$$MPL = 2E+9F+3G [cm] \quad (9)$$

$$W_{tfe} = \text{Volume} \times \text{Density} [kg] \quad (10)$$

(5)~(10)은, 아래와 같이 정리할 수 있다.

- W_a : Window area
- A_c : effective cross section of the core
- A_p : Area product
- MLT: Mean Length Turn
- MPL: Magnetic Path Length
- W_{tfe} : iron weight

(3) 패러데이법칙을 이용하여 프링징자속(Fringing Flux)을 무시한 초기 권선수를 계산한다.[1]

$$N = \frac{V \cdot 10^4}{K_f B_f A_c} \text{ [turns]} \quad (11)$$

(4) Inductance를 계산한다.

$$L = \frac{1}{2\pi f} \frac{V}{I} \text{ [Henry]} \quad (12)$$

(5) 공극의 길이를 계산한다.

$$l_g = \frac{0.4\pi N^2 A_c 10^{-8}}{L} - \frac{MPL}{\mu_m} \text{ [cm]} \quad (13)$$

(6) 프링징효과(Fringing Effect)를 계산한다.

$$F_e = 1 + \frac{l_g L}{\sqrt{A_c}} \ln \frac{2G}{l_g} \quad (14)$$

(7) 프링징효과를 감안한 권선수를 계산한다.

$$N^* = \sqrt{\frac{l_g L}{0.4\pi A_c F_e 10^{-8}}} \text{ [turns]} \quad (15)$$

(8) 새 권선수를 이용하여 실제 자속밀도를 계산한다.

$$B_{ac} = \frac{V \cdot 10^4}{K_f N^* f A_c} \text{ [T]} \quad (16)$$

(9) 권선의 저항 값을 알아낸다. AWG table에서 선택한 Coil에 해당하는 값을 이용한다.

$$R_L = (MLT)(N^*) \left(\frac{\mu\Omega}{cm} \right) (10^{-6}) \text{ [\Omega]} \quad (17)$$

(10) 코일 저항에서의 손실을 계산한다.

$$P_L = I^2 R_L \text{ [watts]} \quad (18)$$

(11) W/K(Watts per Kilograms) : 선택한 재질의 Core loss Curve 그림 6에서 2.3.(8)항으로 구한 B_{ac} 에 해당하는 W/K값을 찾는다.

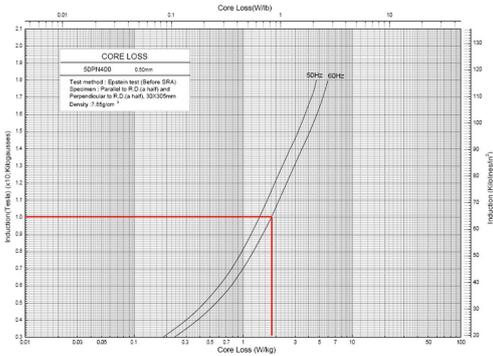


그림 6 50PN400의 코어 손실 특성곡선

(12) 코어에서 발생하는 손실을 계산한다.

$$P_{fe} = (W/K) W_{fe} \text{ [watts]} \quad (19)$$

(13) 공극에서 발생하는 손실을 계산한다.

$$P_g = K_i E l_g f B_{ac}^2 \text{ [watts]} \quad (20)$$

여기서 EI lamination의 경우, $K_i = 0.155$ 로 한다.

K_i 는 Gap loss Coefficient이다.[1]

(14) 전체 인덕터 손실을 계산한다. 식 22로 회로 전체의 효율을 검토한다.

$$P_{\Sigma} = P_{cu} + P_{fe} + P_g \text{ [watts]} \quad (21)$$

$$E_{ff} = \frac{P_o}{P_o + P_{\Sigma}} \quad (22)$$

(15) 인덕터 표면적 전력 밀도

$$\psi = \frac{P_{\Sigma}}{A_t} \text{ [W/cm}^2\text{]} \quad (23)$$

(16) 코어의 온도상승을 계산하여, 목표한 값 이하로 나오는지 검토한다.

$$T_r = 450\psi^{0.826} \text{ [}^{\circ}\text{C]} \quad (24)$$

(17) 실제 윈도우사용율을 계산하여 제작할 코어에 권선이 윈도우 내에 모두 들어갈 수 있는지 예측한다.

$$K_u = \frac{N^* A_w(B)}{W_a} \quad (25)$$

2.4 조도제어를 위한 인덕터의 권선 설계

램프 점등 후, 인덕터를 직렬로 연결하여 Lamp에 공급되는 전류량을 줄여 램프전력을 줄인다. 램프에 전류량을 줄여주면, 램프전력량이 감소하고 조도가 떨어진다. 방전램프는 일정전력 이하로 램프의 아크가 유지되지 못하므로 가변 인덕터를 설계할 때, 이 사항을 고려해야 한다.

본 논문의 자기식 조도제어형 안정기의 가변 인덕터는 적은 권선수로도 큰 인덕턴스를 얻을 수 있기 때문에 상호인덕터(단권)를 이용하여 제작한다. 본 논문의 2.2절에서 램프의 전력에 따른 램프 임피던스가 구해졌으므로 식(26)-(29)와 같이 데이터들을 기본으로 L값을 설계하면 된다. 그림 7의 회로에서 입력전압과 입력전류 그리고 램프의 등가임피던스를 알기 때문에 조도조절용 인덕턴스를 쉽게 구할 수 있다.

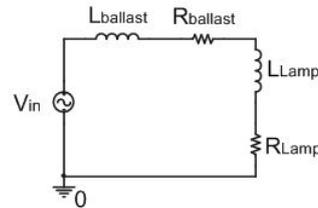


그림 7 안정기와 램프의 정상상태 등가회로

$L_{Ballast}$, $R_{Ballast}$: 안정기의 인덕턴스와 저항

L_{Lamp} , R_{Lamp} : 램프의 인덕턴스와 저항

$$Z_{in} = R_{in} + jX_{in} = R_{in} + j\omega L_{in} \quad (26)$$

$$L_{in} = L_{Ballast} + L_{Lamp} \quad (27)$$

$$R_{in} = R_{Ballast} + R_{Lamp} \quad (28)$$

$$I_{in} = \frac{V_1}{\sqrt{(wL_{in})^2 + R_{in}^2}}, V_1 = 220V \quad (29)$$

권선수가 약간 변경된다고 해서 안정기 저항이 크게 변하지 않기 때문에 입력 측에서 보이는 인덕턴스를 정리하면 식 (30)과 같이 입력전압, 전류 및 각주파수에 관한 식으로 정리된다.

$$L_{in} = \sqrt{\frac{(V_1/I_{in})^2 - R_{in}^2}{w^2}} [H] \quad (30)$$

램프의 인덕턴스를 알기 때문에 안정기의 인덕턴스는 최종적으로 식 (31)과 같다.

$$L_{Ballast} = L_{in} - L_{Lamp} \quad (31)$$

2.5 이그나이터의 동작원리 및 설계

(1) 이그나이터의 동작원리

점화기 회로로 여러 가지 구성이 있지만 그림 8의 회로는 구성이 간단하여 신뢰성이 높고 단가가 저렴하기 때문에 많이 사용된다.[8]

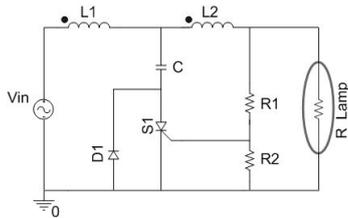


그림 8 이그나이터의 구조

그림 8에서 전원 V_{in} 이 가해지면 R_1 , R_2 의 전압분배에 의해서 S1(SCR Thyristor)의 게이트에 전압이 가해져서 S1이 순간적으로 Turn-on되어 L_1C Under damping으로 L_1 에 발생된 전압이 단권변압기의 원리에 의해 L_2 에 가해진다. 결국 램프에 순간적으로 V_{in} (입력전압), V_{L1} (L_1 양단 전압), V_{L2} (L_2 양단 전압)이 모두 더해진 전압이 가해진다.

(2) 이그나이터의 설계방법

앞에서 언급한 것과 같이 이그니션은 L_1 과 L_2 의 권선비, L_1 과 C의 Under-damping 조건, SCR의 전압/전류용량 등이 중요하게 고려되어야 한다.

① $N_1:N_2$ 권선비의 결정

점등 전, Lamp양단에 걸리는 전압 V_{Lamp} 는 KVL(키르히호프 전압법칙)에 의하여 V_C 와 V_{L2} 의 합으로 나타낼 수 있다. 따라서 Lamp 양단에 발생하는 이그니션 전압의 크기는 식 (32)와 같이 정의 할 수 있다.

$$V_{ignition} = V_c + \frac{N_2}{N_1} V_{L1} = V_{in} + (1 + \frac{N_2}{N_1}) V_{L1} \quad (32)$$

$$(\because V_c = V_{in} + V_{L1}, V_{L1(p)} = \frac{R_1 + R_2}{R_2} V_{GT} + V_{in(p)})$$

식 (32)를 이용하여 $N_1:N_2$ 권선비에 관한 수식으로 나타낼 수 있으며, 식 (33)으로 정리된다.

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{V_{ignition} - V_{in}}{V_{L1}} - 1 \quad (33)$$

② L_1 에 의한 C값의 결정

L_1 이 위에서 결정되었기 때문에 $R_{Loop}L_1C$ 직렬 회로에서 Under Damping의 조건을 이용하여 Capacitance를 결정한다. 단, 여기서 R_{Loop} 은 L_1 과 C, 및 S_1 의 기생저항성분의 합이다.

$$(\frac{R_{Loop1}}{2L_1})^2 < \frac{1}{L_1C} \Rightarrow C < \frac{4L_1}{R_{Loop1}^2} [F] \quad (34)$$

식 (34)의 조건을 만족하면 된다.

③ SCR Thyristor의 결정

SCR Thyristor는 $V_{in(Peak\ to\ Peak)}$ 이상의 Peak Repetitive Forward Blocking Voltage을 가져야 한다. 또한, $I_{T,RMS}$ (On state RMS Current)가 L_1C 의 Under damping 시에 발생할 수 있는 전류 이상을 통틀 수 있어야 한다.

2.6 실험 및 고찰

(1) 조도제어 실험

그림 9는 본론 2.2-2.4를 참고하여 실제 제작한 조도제어형 자기식 안정기의 실험 파형이다. 설계는 램프전력을 100%, 85%, 70% 총 3단계 변화할 수 있도록 하였다. 조도제어 시에는 램프전압은 변화가 적고 램프 전류가 줄어들을 알 수 있다. 입력 전압이 220V/60Hz일 때, 램프전류가 100% 때 2.2A, 85% 때 1.87A, 마지막으로 70%때 1.6A가 흐름으로써 앞에서 시행한 자기식 안정기 설계방법이 타당함을 확인하였다.

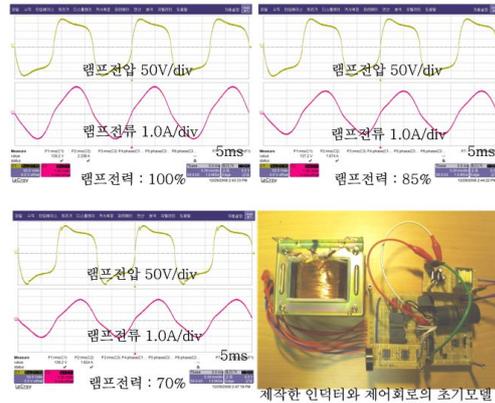


그림 9 조도조절 시 램프의 전압전류 파형

(2) 이그나이터 실험

그림 10은 본론 2.5절의 이그나이터의 동작을 확인한 P-spice 시뮬레이션 파형이다.

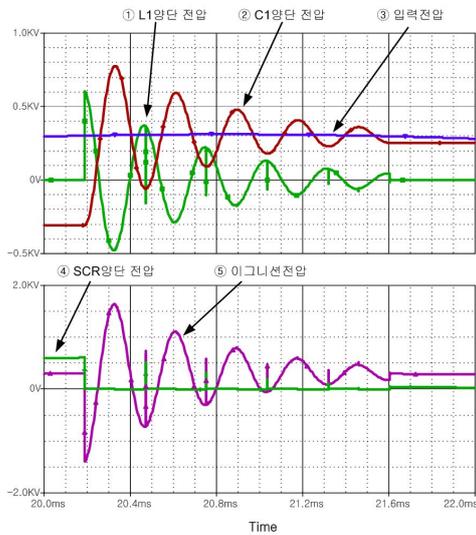


그림 10 이그나이터 시뮬레이션 파형

그림 11-12은 이그나이터의 실험 파형이다. 시뮬레이션 파형과 거의 일치하는 것을 볼 수 있다. 그러나 실험 파형에서는 이그니션 펄스의 반복 횟수가 시뮬레이션 파형보다 적은 것을 관찰할 수 있는데, 이것은 SCR의 기생저항성분이 이론보다 크기 때문이다.

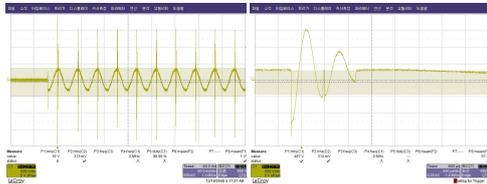


그림 11. 이그니션 전압(500V/div, 20ms) 그림 12. 이그니션 전압(500V/div, 200us)

3. 결론

본 논문에서는 전력에 따른 램프의 임피던스를 구하고 기존의 철심코어형 인덕터 설계방법을 250W 메탈헬라이드 램프용 자기식 안정기에 적합하게 보완하여 최적의 설계 절차를 제시하였다. 그 결과 코어의 크기, 권선수, 손실, 온도상승 정도 그리고 윈도우 사용률 등을 보다 쉽고 정확하게 얻었음을 확인하였다. 또한 전력에 따른 램프의 등가 임피던스를 이용한 조도제어 권선의 설계를 통하여 메탈헬라이드램프의 정확한 조도제어가 가능함

을 실험을 통하여 증명하였다.

마지막으로 본 논문에서 제시한 이그나이터 구조의 설계방법을 제시하고 설계방법을 시뮬레이션과 실험으로 확인하였다. 이 논문에서 제시한 조도 제어형 자기식 안정기의 설계방법이 향후 다양한 산업현장에서 유용하게 쓰일 것으로 기대된다. 그러나 본 안정기 설계는 EI-적층구조에 국한된 것이므로 향후 C-적층구조와 같은 다른 형태의 코어로 안정기로 제작하였을 때 손실과 특성에 대한 비교분석이 이루어져야 할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- [1] Colonel Wm. T. McLyman, "AC inductor design", Transformer and inductor Design Handbook, Marcel Dekker Inc, chapter10, 2004.
- [2] Walter Kaiser Ivan E. Chabu Edward A. C. Lourenco, "Design of a Hybrid Ballast with Magnetic Shunts : Application to Control of HID lamps", IEEE, 1997.
- [3] Walter Kaiser, "Hybrid Electronic Ballast Operating the HPS Lamp at Constant Power", IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, VOL. 34, NO. 2, MARCH/APRIL 1998.
- [4] 박종연, 신동식, 이현진, 임병노, "250W HID-Lamp용 자기식 조도 제어형 안정기 연구", 2007년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집, July. 2007, pp 1996-1997.
- [5] POSCO 전기장관 제품기술팀, "전기장관 Catalog", 2006.
- [6] Chin S. Moo, Ying C. Chuang, Yung H. Huang, Horn N. Chen, "Modeling of Fluorescent Lamps for Dimmable Electronic Ballast", in Proc. IEEE Ind. Applcat. Soc. IAS Annu. Meeting, pp. 2231-2236, 1996.
- [7] Y. K. Eric Ho, Stephen T. S. Lee, Henry Shu-Hung Chung, and S. Y. (Ron) Hui, "A Comparative Study on Dimming Control Methods for Electronic Ballast", IEEE Transaction on Power Electronics, Nov. 2001, vol. 16, No. 6, pp. 828-836, 2001.
- [8] 박종연, 임병노, "HID 램프용 안정기의 접화기 특성분석 및 제어용 IC의 동작영향 분석", 산업기술연구, 제27권 B호, pp. 9-14, 2007.