

碩士學位論文

항공등화 제어 시스템의 고효율  
운전에 관한 연구

指導教授 金 一 煥



제주대학교 중앙도서관  
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

111326

濟州大學校 産業大學院

電子電氣工學科

李 吉 洙

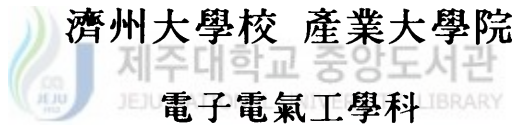
2001

# 항공등화 제어 시스템의 고효율 운전에 관한 연구

指導教授 金 一 煥

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함.

2001年 6月 日



電氣工學專攻

李 吉 洙

李吉洙의 工學 碩士學位 論文을 認准함.

2001年 6月 日

委員長 吳 性 寶



委 員 金 一 煥



委 員 金 豪 贊



# 목 차

LIST OF FIGURES .....	ii
SUMMARY .....	iv
I. 서 론 .....	1
II. 항공등화 제어 시스템 .....	3
1. 기존 제어 시스템 .....	3
2. 제안된 제어 시스템 .....	8
III. 컴퓨터 시뮬레이션 .....	10
IV. 실험결과 .....	15
V. 결 론 .....	19
참 고 문 헌 .....	20

## LIST OF FIGURES

Fig.1 SCR phase control system .....	3
Fig.2 Waveform of AC phase control .....	3
Fig.3 Power factor variation according to firing angle $\alpha$ .....	6
Fig.4 Active power filter .....	8
Fig.5 Block diagram of the proposed control system .....	9
Fig.6 Conventional aeronautical ground lighting control system .....	11
Fig.7 Simulation results of load current with SCR phase control system .....	11
Fig.8 FFT result of source current .....	12
Fig.9 Simulation results of active and reactive power with SCR phase control system .....	12
Fig.10 Schematic diagram of the proposed control system .....	13
Fig.11 Simulation results of load current with the proposed control system .....	13
Fig.12 FFT results of source current .....	14

Fig.13 Simulation results of active, reactive and power factor ..... 14

Fig.14 Results of SCR phase control system ..... 16

Fig.15 FFT results of SCR phase control system ..... 16

Fig.16 Results of inverter system ..... 17

Fig.17 Results of voltage and current ..... 17

Fig.18 Results of source voltage and current ..... 18

Fig.19 FFT result of source current ..... 18



# A study on the high efficiency operation of a aeronautical ground lighting control system

Gil-Soo Lee

DEPARTMENT OF ELECTRONIC AND ELECTRICAL ENGINEERING  
GRADUATE SCHOOL OF INDUSTRY  
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

Supervised by professor Eel-Hwan Kim



JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

## SUMMARY

This paper presents the new control method of a aeronautical ground lighting system. The former control system has been used with SCR switching device for load voltage and load current. In this system, these can be distorted according to firing angle  $\alpha$ . So it generates the harmonics which can interfere the telecommunication and degrade the power quality. In order to decrease these weak points, the high efficiency aeronautical lighting system is designed and implemented.

In the computer simulation, the results of the conventional control system using SCR and proposed control system combined with IGBT PWM inverter and active power filter with PI control are presented. To verify the theoretical analysis, experimental results are shown.

## I. 서론

현대 산업사회에서 다이오드나 SCR을 사용한 전력용기기와 같은 비선형부하의 사용이 크게 증가하여, 이들 부하로부터 발생하는 고조파 성분 전류가 전원계통에 유입되어 전원전압의 왜곡과 통신상의 장애 등 동일계통 내로의 다른 부하기에 악영향을 초래하고 있다(E.Epstein, 1997). 특히 공항에서 많이 사용되고 있는 SCR형 항공등화 제어 시스템은 비행장 활주로등과 같이 직렬로 연결되어 있기 때문에 3단계 혹은 5단계 조도로 제어하기 위하여 정전류 제어 시스템으로 설계되었다(FAA, Advisory Circular). 이 조명 장치에 흐르는 전류를 가변하기 위해서는 SCR의 위상각을 제어하여 부하에 걸리는 평균전압을 제어하여야 한다. 부하에 걸리는 전압은 위상각 제어에 따라 고조파가 많이 포함된 왜형파가 된다. 이것은 많은 고조파를 발생시켜 항공통신 교란이나 역률을 떨어뜨려 계통선의 전력품질을 나쁘게 하는 문제를 야기하게 된다(A.Alexandrovitz, 1984). 이와같이 활주로 등과 같은 항공등화를 제어하기 위한 SCR형 제어 시스템은 여러 가지 문제점이 발생되므로 감사원 감사결과에서도 항공등화 시설의 전원공급용으로 사용하는 SCR형 정전류 조정기는 이용효율이 낮을수록 역률과 고조파 문제가 있어 장기적으로는 이러한 문제를 줄일 수 있는 펄스폭변조 제어방식(Pulse Width Modulation;PWM)을 개발하여 교체하는 방안을 강구하도록 지적한바 있다.

예전에는 이러한 문제를 해결하기 위해 진상용 콘덴서, LC 수동필터등과 같은 보상장치를 이용하여 사용되어 왔다. 그러나 이러한 장치들은 전력계통의 변동에 효율적으로 동작하지 못하고 보상의 정밀도가 떨어져 새로운 안정된 보상시스템이 요구되어져 왔다(J.H.Choi, 1989).

최근 전력용 반도체 소자의 발달과 전력변환장치 제어기법의 개선으로 인하여 새로운 전력 보상 시스템에 대해서 활발하게 연구되어지고 있다

(H.Akagi, 1986).

따라서 본 논문에서는 기존에 사용되었던 SCR형 위상제어방식 대신에 IGBT PWM 인버터 및 능동전력필터를 도입하여 항공등화 제어 시스템의 역률을 개선하고 발생하는 고조파를 억제함으로써 고효율 운전방법을 제안한다. 제안한 새로운 항공등화 제어 시스템의 우수성을 입증하기 위해 컴퓨터 시뮬레이션과 실험을 통하여 기존 제어시스템의 출력특성들과 비교 분석하고자 한다.





## II. 항공등화 제어 시스템

### 1. 기존 제어 시스템

제주공항내의 활주로등과 유도 지시등은 Fig.1과 같은 SCR형 위상제어 시스템을 이용하고 있다.

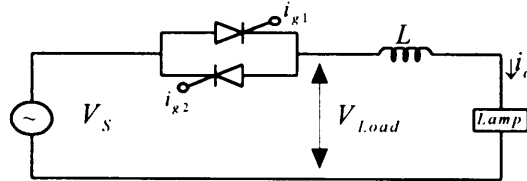


Fig.1 SCR phase control system

비행장 기상조건에 따라 항공등의 밝기를 변화시키기 위해 부하에 흐르는 전류를 일정하게 제어하여야 한다. 기존 제주공항의 시스템에서는 SCR의 점호각을 제어하여 리액터에 흐르는 전류를 제어함으로써 항공등의 조도를 제어하여 왔다. 이 때 조도는 점호각이 크면 조도가 작아지고 점호각이 0에 가까우면 커진다. 만약 리액터의 용량이 램프저항보다 훨씬 적다고 가정하여 임의의 점호각  $\alpha$ 에 대한 부하전압을 나타내면 Fig.2와 같다.

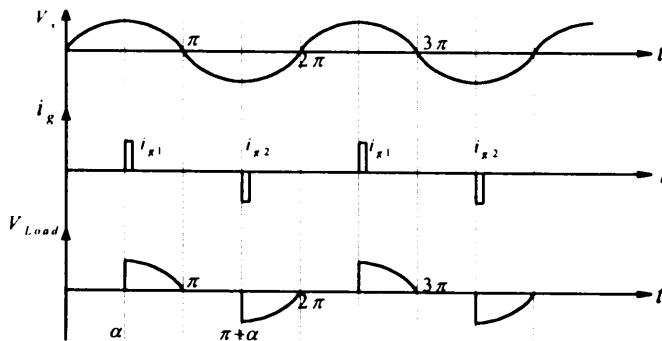


Fig.2 Waveform of AC phase control

단,  $V_s$  : 전원 전압,  $i_g$  : SCR의 게이트전류,  $V_{Load}$  : 부하전압

Fig.2에서 나타난 부하전압을 보면, 완전한 왜형파를 나타내고 있다. 여기서 전원전압  $V_s = \sqrt{2} V \sin \theta$  이고 점호각이  $\alpha$ 일 때, 출력 전압의 반파 평균값  $V_a$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} V_a &= \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \sqrt{2} V \sin \theta d\theta \\ &= \frac{\sqrt{2} V}{\pi} (1 + \cos \alpha) \end{aligned} \quad (1)$$

출력전류  $i_o$ 의 평균값  $i_a$ 는 식(1)로부터

$$i_a = \frac{\sqrt{2} V}{\pi R} (1 + \cos \alpha) \quad (2)$$

이고, 출력전류의 실효값  $i_r$ 은 식(2)로부터 다음과 같다.

$$\begin{aligned} i_r &= \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \left( \frac{\sqrt{2} V \sin \theta}{R} \right)^2 d\theta} \\ &= \frac{V}{R} \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi}} \end{aligned} \quad (3)$$

이때 교류 전원측 역률은 다음과 같은 정의에 의해 나타낼 수 있다.

$$\text{역률}(PF) = \frac{\text{유효전력}(P)}{\text{피상전력}(S)} \quad (4)$$

역률을 구하기 위해서 먼저 유효전력  $P$ 와 피상전력  $S$ 를 구해야 한다. 교류전원측으로 부터 부하에 공급되는 유효전력  $P$ 는

$$P = i_r^2 \cdot R \quad (5)$$

이고, 교류전원의 피상전력  $S$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$S = V \cdot i_s \quad (6)$$

여기서,  $V$ 는 교류전원 전압  $V_s$ 의 실효값이고  $i_s$ 는 전원전류의 실효값이다. 식(5)와 식(6)을 식(4)에 대입하면 역률은 다음과 같다.

$$PF = \frac{i_r^2 \cdot R}{V \cdot i_s} \quad (7)$$

그런데 전원전류의 실효값  $i_s$ 와 부하전류의 실효값  $i_r$ 은 같으므로 식(7)은 다음과 같다.

$$PF = \frac{i_r \cdot R}{V} \quad (8)$$

여기서 출력전류의 실효값  $i_r$ 은 식(3)과 같으므로 이를 식(8)에 대입하여 정리하면 점호각  $\alpha$ 에 대한 역률의 식은 다음과 같이 나타내어 질 수 있다.

$$PF = \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi}} \quad (9)$$

식(9)에서 나타남과 같이 점호각  $\alpha$ 가 0이면 역률은 1이지만  $\alpha$ 값이 커지면 커질수록 역률이 나빠짐을 알 수 있다. 이를 이용하여 점호각  $\alpha$ 의

변화에 대한 역률의 변화를 나타낸 것이 Fig.3이다.

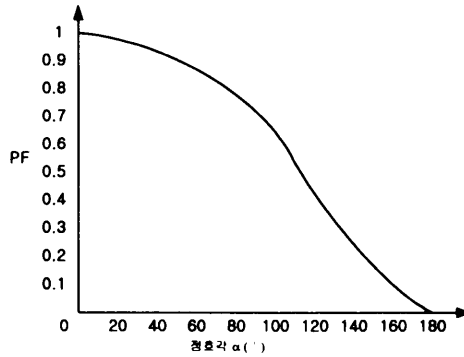


Fig.3 Power factor variation according to firing angle  $\alpha$

또한 SCR을 이용한 위상제어 방식은 부하에 걸리는 전압이 점화각  $\alpha$ 의 크기에 따라 왜형파가 되어 전원에 고조파가 나타난다. 만약 +, - 양파의 제어각  $\alpha$ 에서 불평형은 없다고 하면 교류 전류에 포함된 각 고조파는 부하에 흐르는 전류  $i_o$ 를 푸리에 급수로 해석하여 다음과 같이 나타내어 질 수 있다.

$$i_o = \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos n\theta + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin n\theta \quad (10)$$

여기서,

$$\begin{aligned} a_n &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} i_o \cos n\theta d\theta \\ &= \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} i_o \cos n\theta d\theta \\ b_n &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} i_o \sin n\theta d\theta \\ &= \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} i_o \sin n\theta d\theta \end{aligned} \quad (11)$$

n차 고조파의 실효치(rms)값은 다음과 같다.

$$i_{nr} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad (12)$$

저항 부하에서  $i_o$  는 다음과 같이 된다.

$$i_o = \frac{\sqrt{2}V}{R} \sin \theta \quad (\alpha < \theta < \pi) \quad (13)$$

식(13)을 식(11)에 대입하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$a_n = \frac{2}{\pi} \int_a^\pi \frac{\sqrt{2}V}{R} \sin \theta \cos n\theta d\theta \quad (14)$$

$$b_n = \frac{2}{\pi} \int_a^\pi \frac{\sqrt{2}V}{R} \sin \theta \sin n\theta d\theta \quad (15)$$

식(14)와 식(15)을 식(11)에 대입하면  $a_n$ 과  $b_n$ 은 다음과 같이 표시된다.

$$a_n = \frac{2}{\pi} \int_a^\pi \frac{\sqrt{2}V}{R} \sin \theta \cos n\theta d\theta \quad (n \neq 1) \quad (16)$$

$$b_n = \frac{2}{\pi} \int_a^\pi \frac{\sqrt{2}V}{R} \sin \theta \sin n\theta d\theta \quad (n \neq 1) \quad (17)$$

$$a_n = \frac{\sqrt{2}V}{\pi R} \left\{ \frac{\cos(n+1)\alpha - \cos(n+1)\pi}{n+1} - \frac{\cos(n-1)\alpha - \cos(n-1)\pi}{n-1} \right\}_{n \neq 1} \quad (18)$$

$$b_n = \frac{\sqrt{2}V}{\pi R} \left\{ \frac{\sin(n+1)\alpha}{n+1} - \frac{\sin(n-1)\alpha}{n-1} \right\}_{n \neq 1} \quad (19)$$

식(18)과 식(19)을 보면  $n \neq 1$ 이 아닌 경우 점호각  $\alpha$ 에 대해서  $a_n$ 과  $b_n$ 을 가지므로 고조파 분이 포함되고 있음을 알 수 있다. 이것은 전자유도 장애의 원인이 되어 공항 내 통신시스템에 큰 문제를 야기 시킬 수도 있다.

## 2. 제안된 제어 시스템

현재 제주공항에 사용되고 있는 항공등화 제어 시스템은 SCR를 이용한 위상제어 시스템이기 때문에 부하에 나타난 전류 성분에는 많은 고조파 성분을 내포하고 있다. 이러한 고조파 성분을 제거하기 위해서 최근 능동전력 필터(Active Power Filter ; APF)가 많이 사용되고 있다. 능동전력 필터의 원리는 Fig.4 에 간단하게 나타나 있다.

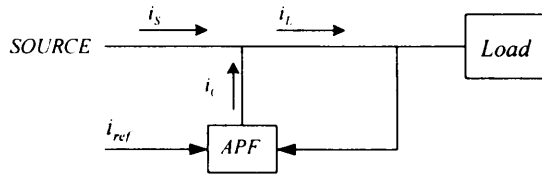


Fig.4 Active power filter

Fig.4는 전류주입식 병렬형 능동전력필터 시스템의 구성을 보여주고 있다. 전체시스템은 제어부와 전력회로로 나뉘어진다. 제어부는 부하전류에서 기본파 성분과 고조파 성분을 분리, 능동필터가 계통에 주입해야 할 보상기준전류를 검출해내는 기능을 하는 보상전류 검출부와 검출된 전류의 파형을 PWM컨버터를 통해 근사적으로 구현하기 위한 전류제어부로 나뉘어진다. 전력회로는 전력용 반도체 스위칭 소자로 구성되는 인버터와 유사한 구조를 지니고 있으며 PWM으로 동작, 전류제어기의 지시에 따라 필요한 전류를 만들어 낸다. 만일  $i_L$ 이 구형파의 형태를 지니고 있다면 이는 정현파의 기본파 성분과 이 성분을 제외한 나머지 고조파 성분의 합으로 구성된다. 따라서 능동필터의 고조파 보상전류  $i_c$ 를 부하전류의 고조파 성분과 일치하게 제어하면 전원전류  $i_s$ 에는 기본파 성분만 남게된다. 즉 능동형 전력필터는 고조파 전류주입에 의해 부하의 고조파전류를 전원 대신 부담하는 역할을 수행한다.

이를 이용하여 제안한 새로운 제주공항 항공등화 제어 시스템의 블록

선도는 Fig.5 같으며

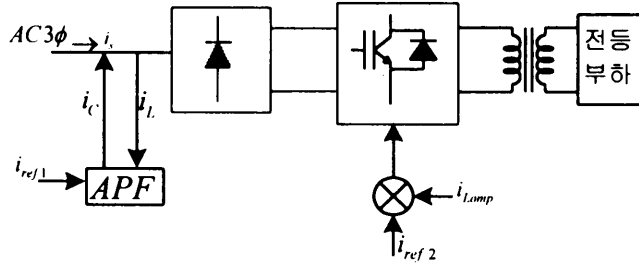


Fig.5 Block diagram of the proposed control system

전등부하에 인가되는 전원의 주파수는 60[Hz]이고, 전류의 크기에 따라 전등부하의 조도가 달라진다. IGBT 소자를 이용한 단상 인버터를 사용하여 전류 제어나 주파수 제어를 행하면 전등의 조도를 제어할 수 있다. 이때 인버터 전원이 직류를 필요로 하기 때문에 다이오드를 이용한 전과정류회로가 구성된다. 이것은 전원에서 입력되는 전류는 왜형파가 되어 고조파를 포함하고 있다.

이 고조파 성분을 능동전력필터를 이용하여 제거하면 전원전류가 정현파가 되고 역률이 개선이 되어 우수한 항공등화 제어 시스템으로 역할을 할 수 있다.

### Ⅲ. 컴퓨터 시뮬레이션

기존에 많이 사용하고 있는 SCR형 항공등화 제어 시스템을 해석하기 위하여 제주 공항에 설치된 시스템을 모델로 정하여 Fig.6과 같은 제어 시스템을 구성하였다. 이 시스템에서 항공등화 조도를 변화주기 위하여 Fig.6에 나타낸 것과 같이 항공등화를 직렬로 연결하여 항공등화에 흐르는 전류를 SCR의 위상각  $\alpha$ 를 제어하여 구현하고 있다. Fig.7은 항공등화에 2.8[A]가 흐르도록 명령을 주었을 때 부하에 흐르는 전류와 전원 전압, 전원전류의 파형을 나타내고 있다. 이 그림에서 보면 전원에 새 부하에 흐르는 전류 파형이 왜형파를 나타내고 있어 고조파가 내포하고 있음을 알 수 있다. 이에 대한 파형을 Fig.8에 나타내고 있다. 또한 유효전력과 무효전력 그리고 역률의 변화를 Fig.9에 나타내고 있다. 이 파형을 보면 전류의 기준치가 적어 점호각이 컸을 때 전원측에 나타나는 역률이 매우 저조함을 알 수 있다.

다음으로 제안된 시스템의 타당성을 검증하기 위해 Fig.10과 같은 제어 시스템을 설계하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 이 시스템은 크게 두 부분으로 구성되었다. 첫째는 능동전력필터 부분이고 다음은 전등에 교류를 구현하기 위한 단상인버터 부분이다. 능동전력필터 제어에서는 샘플링 시간을  $100[\mu s]$ 로 하였으며, 직류전압은  $400[V]$ 로 유지하였으며 리액터의 용량은  $3[mH]$ 이다. 그리고 단상인버터는  $60[Hz]$ 의 출력 주파수를 가지며  $500[W]/220[V]$ 의 전등부하를 사용하였다. Fig.11과 Fig.12 그리고 Fig.13은 제안된 제어시스템의 시뮬레이션 결과들이다. Fig.11을 분석해보면 저전류 운전영역인  $2.8[A]$ 의 실효치 명령값을 인가했을 때 부하에 흐르는 전류는 거의 정현파에 가깝게 나타나고 있음을 알 수 있다. 전원전류에 대한 고조파 분석결과를 Fig.12에 나타내고 있다. 이 파형을 보면 기존시스템 FFT 출력파형 Fig.8과 비교했을 때 현저하게 고조파가 저감되고 있음을 알 수 있다.



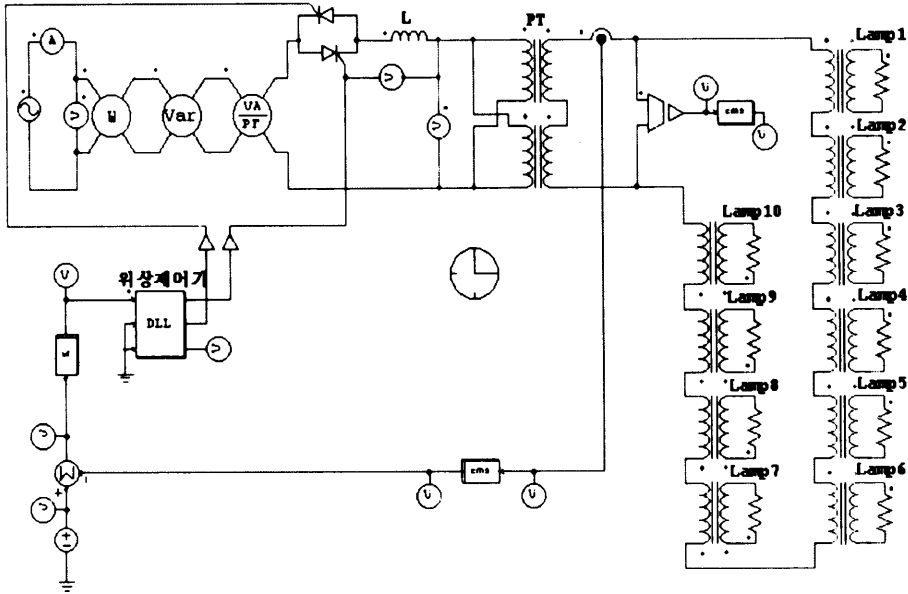


Fig.6 Conventional aeronautical ground lighting control system

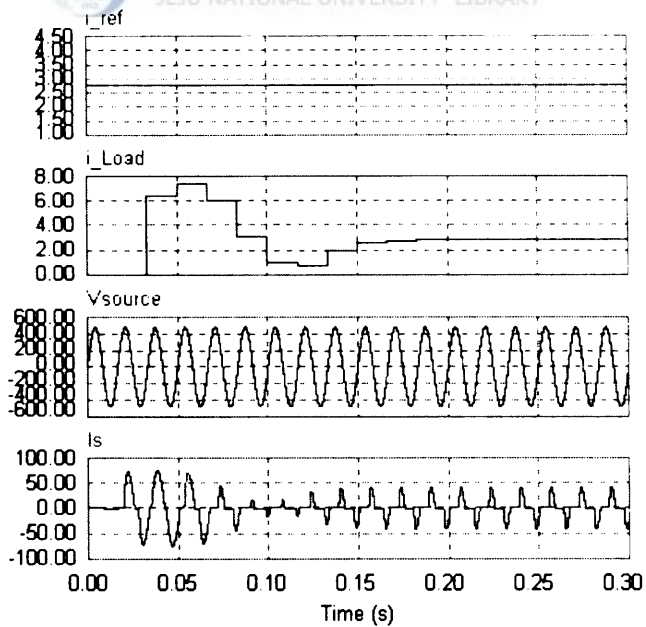


Fig.7 Simulation results of load current with SCR phase control system

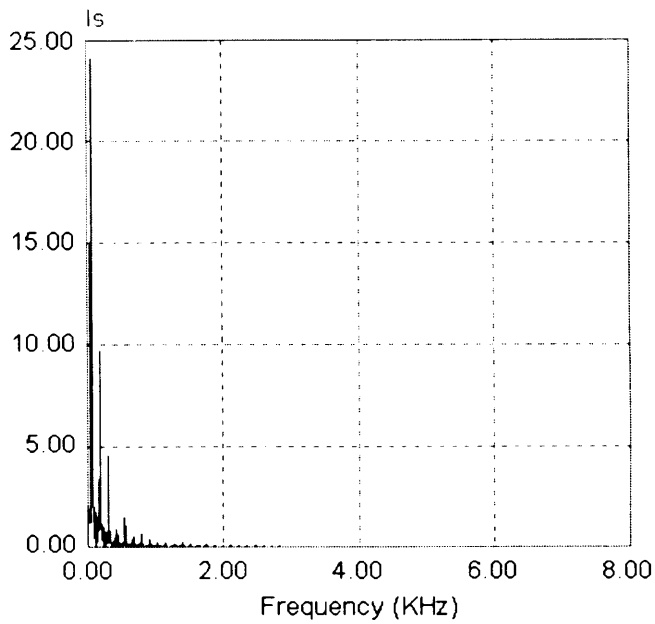


Fig.8 FFT result of source current

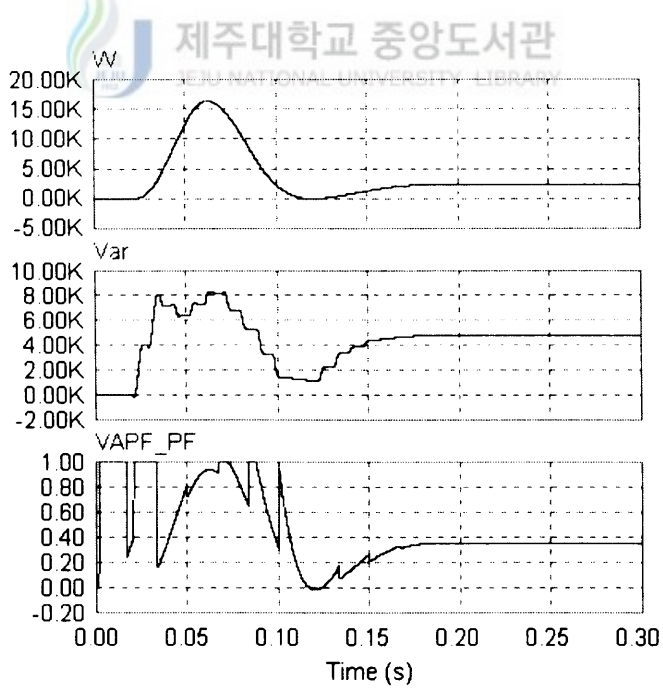


Fig.9 Simulation results of active and reactive power with SCR phase control system

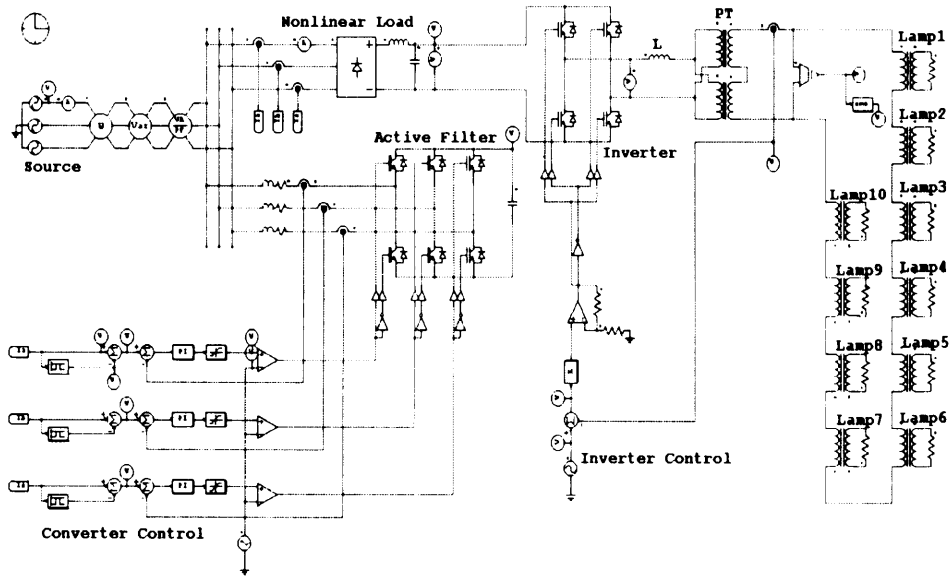


Fig.10 Schematic diagram of the proposed control system

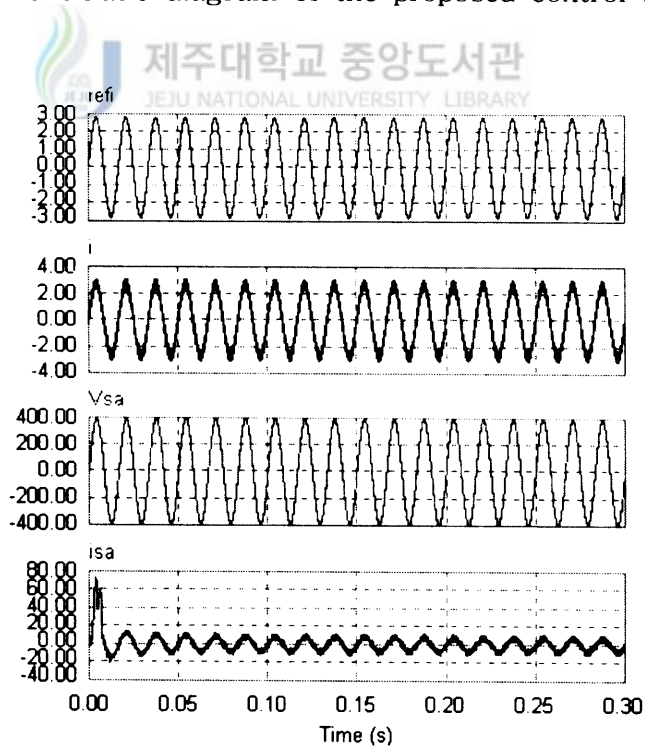


Fig.11 Simulation results of load current with the proposed control system

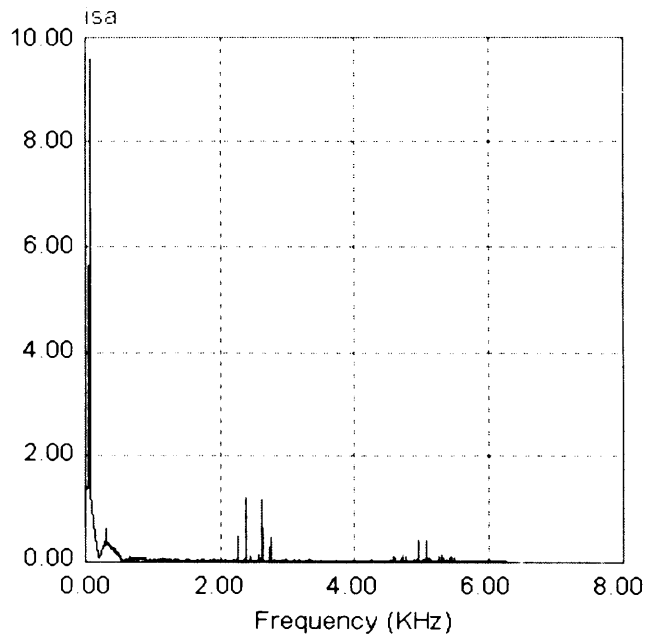


Fig.12 FFT result of source current

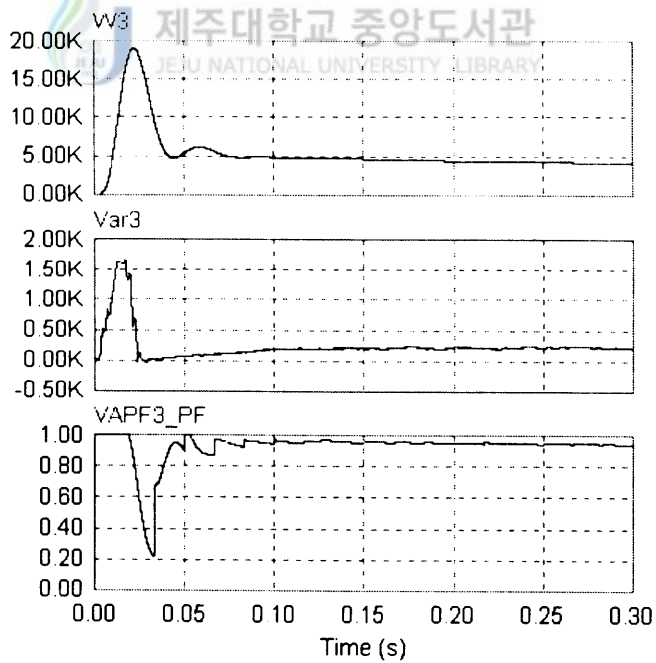


Fig.13 Simulation results of active, reactive and power factor

## IV. 실험 결과

제안된 새로운 항공등화 제어 시스템의 타당성을 입증하기 위해 3상 IGBT 능동전력필터와 단상 인버터 그리고 TMS320C31 DSP 시스템을 이용하여 Fig.10과 같은 형태로 실험을 행하였다. 능동전력필터 제어에서 직류전압 제어 시는 샘플링 시간을 1[ms], 전류제어 시는 100[ $\mu$ s]로 수행하였다. 리액터의 용량은 3[mH]를 사용하였으며 능동전력필터의 직류전압은 400[V]가 유지되도록 제어하였다. 단상인버터 제어에서는 출력 교류가 60[Hz]가 되도록 하였으며 부하에는 500[W]/220[V] 전구와 0.6[H]를 갖는 리액터를 연결하였다. Fig.14는 기존 제주공항에서 사용되고 있는 항공등화 시스템을 이용하여 부하에 2.8[A]가 흐르도록 한 경우에 부하에 걸리는 전압과 전류파형을 나타내고 있다. 이 파형을 보면 시뮬레이션에서 나타난 것과 같이 부하에 흐르는 전류의 파형이 크게 왜형파를 나타내고 있다. Fig.15는 이 부하전류에 대한 FFT 결과를 나타내고 있다. 이 파형에서 보면 고조파가 아주 많이 발생되고 있음을 알 수 있다. Fig.16는 부하에 공급되는 인버터 출력전압과 전류파형을 나타내고 있다. 이 파형에서 보면 전압은 구형파이지만 전류는 정현파에 가까움을 알 수 있다. Fig.17은 단상인버터와 능동전력필터가 정상적으로 운전되고 있을 때 출력결과들을 나타내고 있다. 이 파형에서 [1]은 전원 상전압이고 [2]는 전원측의 상전류이다. [3]은 인버터 입력단의 교류전류파형을 나타내고 있다. [4]는 능동전력필터의 전류를 나타내고 있다. Fig.18은 전원측의 상전압과 상전류를 나타내고 있는데 두 파형을 비교하여 보면 전압과 전류의 위상이 거의 비슷하며 전류의 파형은 정현파에 가깝다. 이는 전류에 포함된 고조파가 적음을 예측할 수 있고 역률도 거의 1에 가까움을 알 수 있다. Fig.19은 전원전류에 대한 FFT 분석결과를 나타내고 있다. 기존 시스템에서 나타난 Fig.9와 비교해 보면 고조파가 크게 저감되고 있음을 알 수 있다.

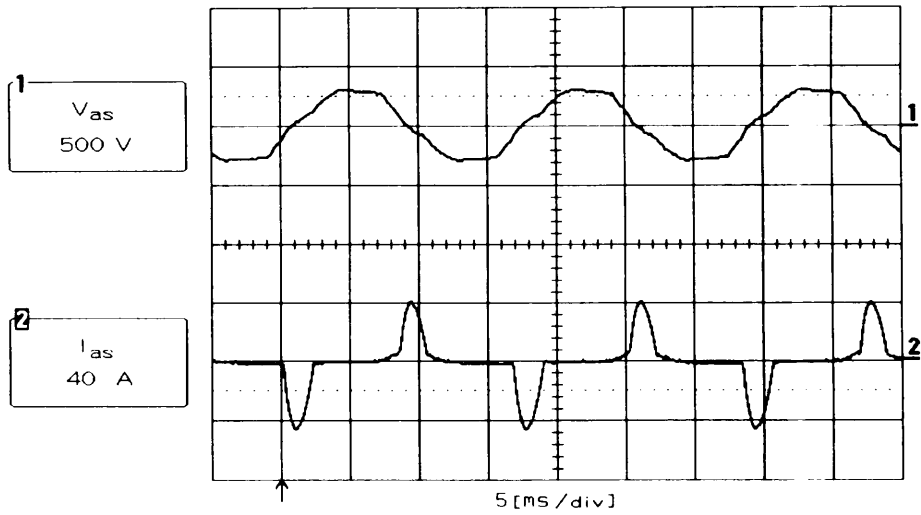


Fig.14 Results of SCR phase control system

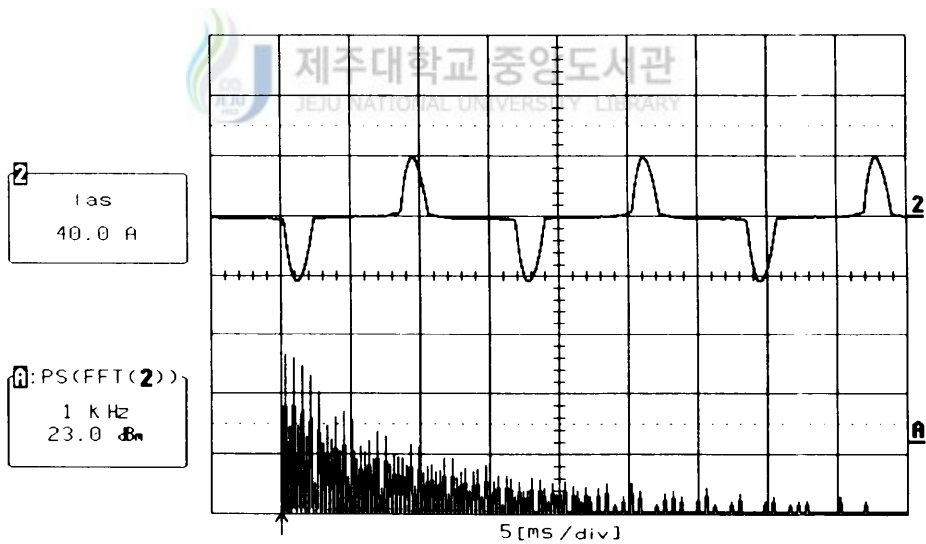


Fig.15 FFT results of SCR phase control system

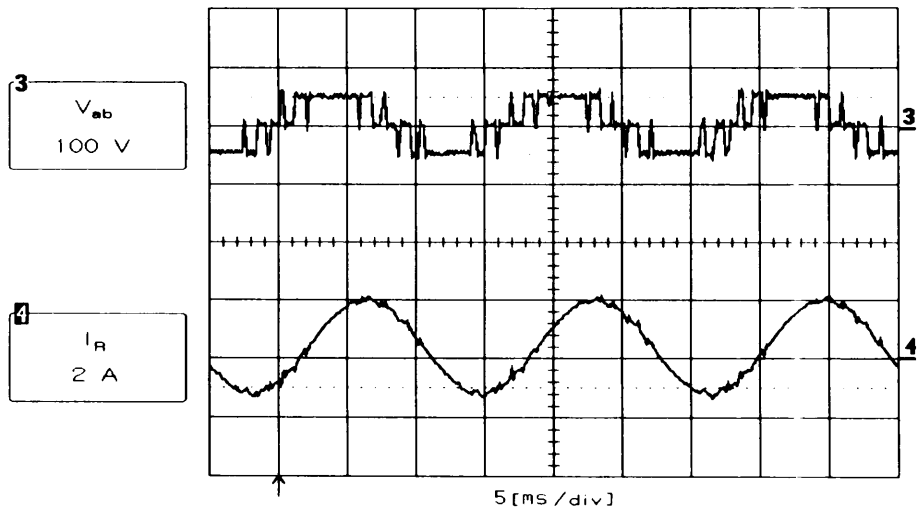


Fig.16 Results of inverter system

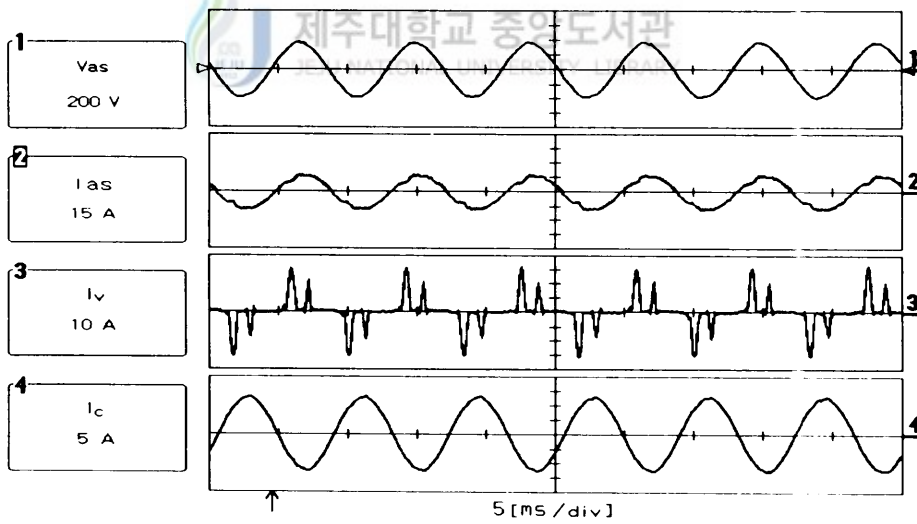


Fig.17 Results of voltage and current

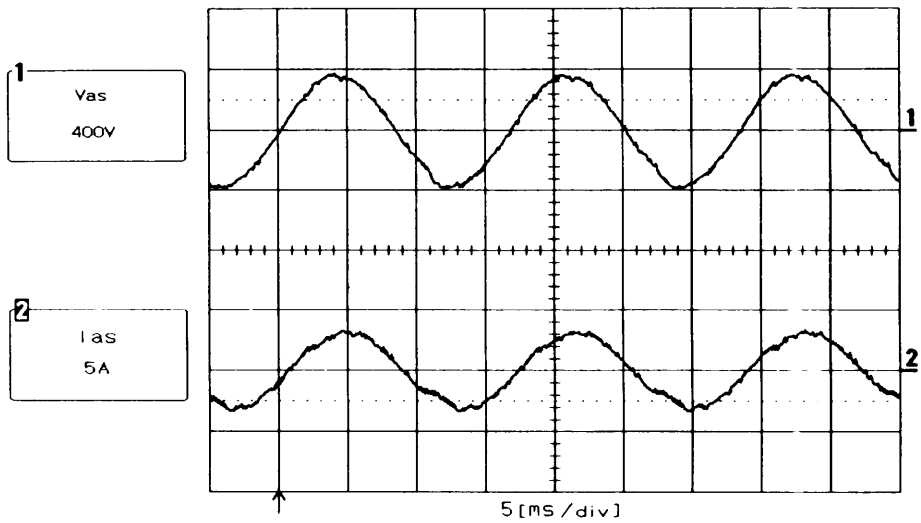


Fig.18 Results of source voltage and current

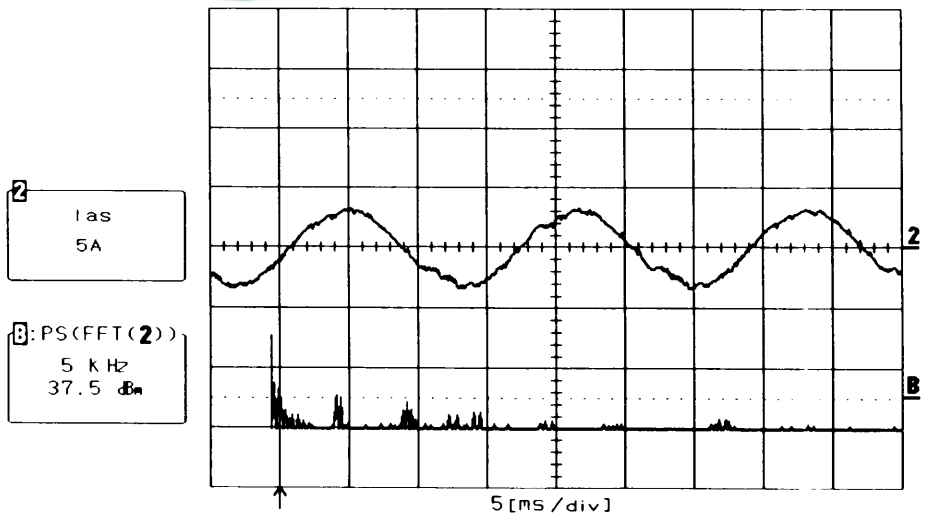


Fig.19 FFT result of source current



## V. 결 론

본 논문에서는 공항의 활주로등이나 유도등과 같은 항공등화의 고효율 운전을 위한 새로운 형태의 항공등화 제어 시스템을 제안하였다. 제안한 시스템의 타당성을 검증하기 위하여 기존제어시스템과 제안한 제어시스템의 전등부하 운전에 대한 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다.

수행결과에서 보면 기존시스템에서는 고조파가 많이 발생되고 있고 역률도 크게 저하되어 있음을 알 수 있었다. 반면에 제안한 제어시스템에서는 고조파 발생이 크게 줄어들었고 역률도 크게 개선되었다. 컴퓨터 시뮬레이션 결과를 실험적으로 검증하기 위하여 실험을 행하였다. 실험결과에서도 컴퓨터 시뮬레이션 결과와 마찬가지로 기존 제어시스템에 비해 새로 제안한 제어시스템의 운전특성들이 훨씬 양호하게 나타났다. 이상과 같은 모든 결과들을 종합해 보면 본 논문에서 제안한 새로운 형태의 항공등화 제어시스템을 현장에 적용하면 고조파 발생에 따른 통신유도 장애 문제나 역률 저하 문제를 크게 개선시킬 수 있어 항공등화 제어시스템을 고효율로 운전하는데 크게 이바지 할 것으로 기대된다.

## 참 고 문 헌

E. Epstein, 1979, "Analysis of a reactive current source used to improve current drawn by static inverters", IEEE. Trans. Ind. Electr. Contr. Instrm., vol. IECI-26, no.4, pp.172-177.

FAA advisory circular AC 150/5345-10E.

A. Alexandrovitz, 1984, "Analysis of a static var compensator optimal energy storage element", IEEE Trans. Ind. Electr., vol. IE-31, no.1, pp.28-33.

J.H. Choi, 1989, "Instantaneous reactive power compensator using current controlled PWM Converter", Trans. KIEE, vol.38. no.7, JUL.

H. Akagi, 1986, "Control strategy of active power filter using multiple voltage source PWM converter", IEEE Tans. Ind. Appl., vol. IA-22, no.3, pp.460-465.

G.H. Choe, 1986, "Analysis an control of active power filter with optimized injection", in Conf. Rec. IEEE PESC, pp.401-409.

S.B. Dewan, 1985, "Design an input filter for the six-pulse bridge rectifier", IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 1, IA-21, no.5, pp.1168-1175.

## 감사의 말씀

대학원 입학에서부터 지난 2년 반 동안 본 논문이 완성되기까지 물심양면으로 지도하여 주시고 이끌어주신 김일환 교수님께 깊은 감사를 드립니다.

또한 바쁘신 중에도 논문의 심사를 맡으셔서 세심하게 검토해 주시고 부족한 점을 보완하여 주신 오성보 교수님, 김호찬 교수님, 그리고 항상 격려와 조언을 해주신 좌종근 교수님, 이개명 교수님, 김호찬 교수님께 감사를 드립니다.

실험실에서 밤늦도록 실험을 같이 하고 자료를 정리하는데 도움을 준 김재홍 원생을 비롯하여, 김용현 선생님, 전영진 원생, 김정웅 원생에게도 고마움을 전합니다.

끝으로, 힘든 뒷바라지였음에도 불구하고 묵묵히 지켜주었던 가족들에게 진심어린 감사의 마음을 전하며 이 기쁨을 나눌 수 있기를 간절히 바랍니다.

2001년 6월

이 길 수