

항공관제용 정전류조정(CCR) 인버터 시스템의 개발

손진근* · 박종찬**

*경원전문대학 전기제어시스템과**오산대학 전기시스템제어과

A Constant Current Regulated Inverter System for Lighting and Beaconing of Aerodromes

JinGeun Shon* · JongChan Park**

*Kyungwon College**Osan College

Abstract - According as level of industry develops day after day, electricity load system of industry requires high level control, effectiveness and high efficiency. Among supply and control unit of suitable power supply in these load characteristic, inverter systems of constant current regulate is used widely control of lighting and electric heating system. Therefore, in this paper proposed an inverter systems with constant current regulation and power factor correction (PFC) circuit for Lighting and Beaconing of Aerodromes. The effectiveness of the proposed system confirmed through experimental results of CCR.

1. 서론

항공기의 이착륙을 안전하게 유도하기 위한 비행장의 조명기구에 전원을 공급하기 위한 전원장치인 정전류조정기(Constant Current Regulator : 이하 'CCR')는 직렬부하회로(활주로진입등, 활주로등, 활주로 중심선등, 접지대등, 진입 각 지시등, 유도로등 및 기타 등화)에 일정한 전류를 공급하는 장치로 전원전압, 주파수, 부하용량의 변동에도 능동적인 작동으로 부하에 정 전류를 공급하는 장치이다. 그러므로 악조건의 환경에서도 높은 신뢰성을 가지고 일정한 전류를 부하에 공급할 수 있어야 하며 자기진단기능 등 다양한 기능을 요구하고 있는 장치이다.

현재 사용되고 있는 항공관제용 정전류 조정기는 크게 네 가지 종류로 분류하고 있는데, i) 리액터와 콘덴서의 공진회로를 응용한 CR형 CCR과 ii) 부하전류의 변동을 검출하여 부하에 직렬로 접속된 리액터와 실효임피던스를 조정하는 SR형 CCR, iii) 부하전류의 변동을 검출하여 역병렬로 접속한 사이리스터의 점호각을 조정하여 전류를 제어하는 SCR형 CCR이 있으며, iv) 입력전원을 정류한 후 PWM제어방식을 도입하여 출력전류를 일정하게 제어하여 사인파 출력을 공급하는 인버터형 CCR이 있다.

종래의 방식으로 사용되고 있는 CR형 CCR은 전원전

압이나 주파수의 변동에 따른 출력전류의 변동이 심하며, SR형 CCR은 트랜스의 제조가 어렵고 상대적으로 크며, SCR형은 응답성이 빠르고 제어소자의 손실이 적어 효율이 높은 반면 전류의 왜곡이 심하여 높은 고조파 성분을 포함하고 있으며 조명밝기 제어에 따른 역률의 변동이 매우 심한 문제점이 있다.

따라서, 본 논문에서는 PWM기법을 적용한 항공관제용 정전류 조정 인버터 시스템의 개발에 관하여 논하고자 한다. 이러한 인버터형 CCR은 AC 입력을 DC로 변환한 후 반도체 제어소자(IGBT)를 PWM방식으로 제어하므로 응답성이 빠르고 제어소자의 손실이 적으며, 출력전류파형을 사인파로 제어가 가능하다. 또한 3상 입력전원을 적용할 경우 부하 불균형에 의해 야기되는 문제들을 최소화 할 수 있으며, SCR형 CCR보다 고조파 성분의 발생이 매우 적어 타 제어장치에 오동작의 영향을 최소화 할 수 있다.

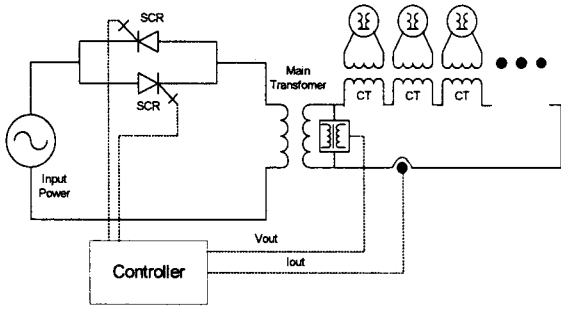
또한, 주 제어변압기의 크기와 중량을 현격하게 줄일 수 있는 장점이 있으며, 고속의 스위칭기법을 채용하여 EMI 내성을 강화할 수 있고, PFC(power factor correction)회로를 채용하여 역률을 자동제어 할 수 있고, PLC(Power Line Communication)를 적용하여 개별 전구제어 감시 장치의 통신품질도 현재의 위상제어방식보다 월등하게 높일 수 있다는 장점이 있다. 따라서 본 논문에서는 위와 같은 기능을 가지는 CCR 인버터 시스템을 시제작하여 전류제어 및 PFC의 다양한 실험결과를 제시하기로 한다.

2. 항공관제용 CCR의 구성

2.1 SCR형 CCR

그림 2.1은 기존 항공관제용 조명제어장치에 주로 사용되고 있는 SCR을 이용한 CCR type 교류전력제어장치의 일례를 나타낸 것이다. 이는 전원제어 위상각 α 를 제어하여 교류부하의 전류를 제어하며, 이때의 위상각 α 는 부하의 상태에 따른 제어기의 기준신호에 의해 조정된다. 이러한 회로는 교류 부하단에 변압기가 있고, 변압

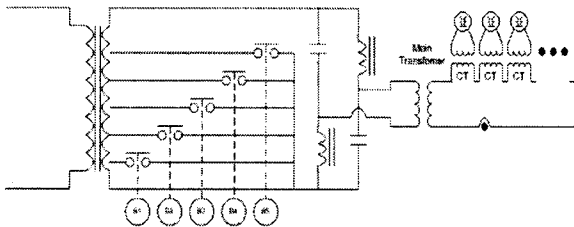
기 2차 측에는 또 다른 복수개의 변류기(CT)가 직렬로 연결되어 있으며, 변류기의 2차측에는 조명등이 연결되어 있는 전형적 CCR회로이다.



〈그림 2.1〉 기존의 SCR형 CCR 시스템

특히, 위와 같은 전력제어장치는 복수개의 단심구가 직렬로 연결되어 있으므로 어느 전구하나가 고장이 나더라도 다른 전구는 계속 정상적인 동작을 행하여야 하며, 이때의 부하 전구는 조명발기의 일정유지와 수명 등의 관리를 위하여 이와 같은 CCR 제어장치가 절대적으로 필요하다.

이러한 제어장치는 시스템의 구성이 간단하여, 저 가격의 구현이 가능하고 시스템의 전체 효율이 우수하다는 장점이 있으나 입력의 역률 저하, 느린 부하 응답 특성으로 사고 발생시 과급 효과 크고, 전류의 불연속으로 인하여 많은 고조파 성분이 발생하고, 부하의 불평형에 따른 상호 간섭작용이 발생한다는 문제점이 있다. 또한 이와 유사한 방법으로 공진형 CCR(그림 2.2)을 사용할 수 있으나 공진의 파라미터 튜닝 및 시스템의 구성이 어렵다는 단점이 있다.



〈그림 2.2〉 공진형 CCR의 구성도

2.2 인버터형 CCR

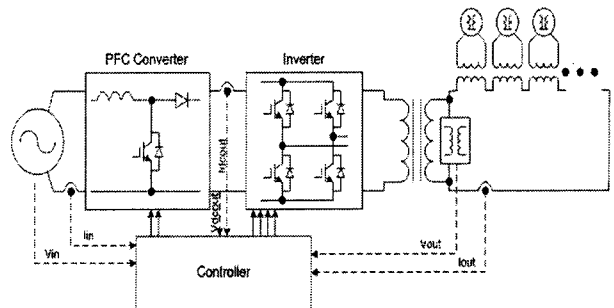
그림 2.3은 그림 2.1과 같은 부하시스템에 역률제어 기능을 가지는 PFC 컨버터와 인버터가 장착되어 있는 CCR을 보여주고 있다. 현재 Inverter형 CCR을 생산하고 있는 메이커는 이탈리아의 Augier社와 다국적 기업인 SIMENS ADB社로 현재까지 신설 또는 유지보수 중인 공항의 항공 등화 설비의 전원장치로 독보적인 시장점유를 하고 있다. 또한 기존의 SCR 방식의 CCR 가격보다 2배 이상 높은 가격으로 시장에 출시되고 있음에도 불구하고

하고 향후 항공 등화의 추세가 기존의 할로젠 램프에서 LED로 변화되고 있는 단계에서 LED 등화 설비의 특성상 위상 정류의 입력 전원보다 정현파의 정전류에서 보다 나은 특성을 나타내고 있기에 인버터형 CCR의 선호도가 높아지고 있는 추세에 있다.

현재 항공 관제 설비의 원격화 및 통합화의 추세에 따라 이러한 설비의 전원을 공급하고 있는 CCR의 경우 타 설비들과 연동하여 제어되며, 공항 등화 설비의 유지보수 상의 어려움으로 인해 개별 전구 감시 시스템과 항공 교통 관제 설비의 통합 시스템인 VGCS(Visual Ground Control System)보급으로 인해 CCR의 전력선을 이용한 전력선 통신이 많이 보급되고 있는 현실에서 위상 정류를 사용하고 있는 SCR형 CCR 경우 전력선 통신의 통신 속도에 지대한 악 영향을 미치고 있기에 인버터형 CCR의 수요는 지속적으로 확장될 것으로 사료된다.

또한 기존의 SCR 방식의 CCR 경우 FAA 및 IEC와 같은 국제 규격에 부적합한 경우가 많아 국제 공항 규모의 항공 등화 설비의 정전류 전원장치로 부적합 경우가 많았으나 인버터형 CCR은 이러한 단점을 보완하고, 향후 개별 전구 감시 시스템 및 통합 항공 교통 통제 시스템에 적용하여 보다 나은 전력 품질을 보장할 수 있을 것으로 예상된다.

위와 같은 기능을 갖는 항공관제용 CCR 시스템은 선진국의 경우에는 이미 개발을 추진하고 있거나 출시되고 있으며, 부하측의 여러가지 상황들을 CCR에서 파악하여 상위시스템과 정보를 송수신 할 수 있는 통신이중화 기능 및 다양한 기능을 갖는 새로운 제어방식인 인버터형 CCR을 개발하고 있는 추세로 제품의 기능향상과 다양한 기능을 갖는 인버터형 CCR의 개발이 절실히 요구되고 있다.



〈그림 2.3〉 인버터형 CCR의 구성도

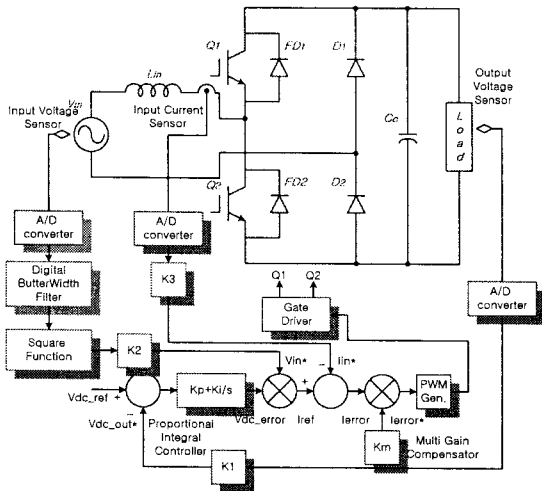
3. CCR 시스템의 설계 및 제작

3.1 PFC 제어회로의 구성

일반적으로 고역율, 저리플의 PFC기능을 갖는 AC/DC 컨버터는 2개의 제어 루프로 구성되는데 이 제어루프는 입력전압에 비례하는 기준전류와 입력전류를 비교하여 입력 전류 파형의 모양을 입력 전압 파형에 따라 추종하

도록 하는 전류제어루프, 출력전압과 기준전류의 크기를 조절함으로써 원하는 전압을 얻는 기준전압을 비교하여 입력전압을 승압시키는 전압루프이다. 전류제어루프 제어기법은 평균 전류모드 제어기법을, 전압제어루프 제어기법은 비례-적분 제어기를 일반적으로 사용한다.

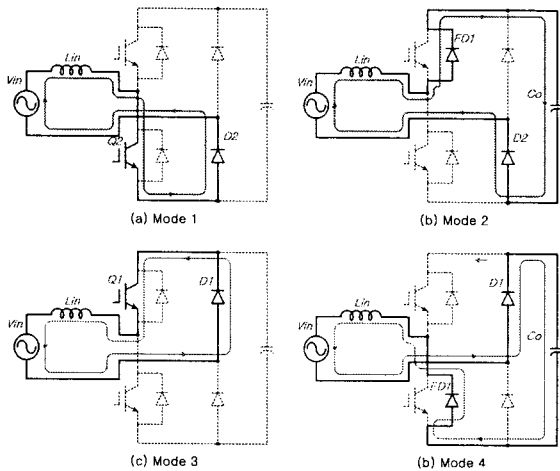
본 논문에서의 PFC구성은 그림 3.1과 같이 하프브리 지 형태의 승압형 AC/DC 컨버터의 구조를 갖도록 하며, 입력 전압의 제로-크로스(zero-cross)부근에서의 전류 왜곡 및 스위칭시의 노이즈가 발생, 제어루프의 간단화를 위하여 전류제어루프에서의 가변 이득을 가지는 단상 PFC 디지털 제어기를 적용한 고역률 승압형 컨버터를 적용하였다.



〈그림 3.1〉 가변 이득을 갖는 디지털 PFC 제어기

그림 3.2는 그림 3.1의 구조와 같은 승압형 컨버터의 동작모드를 나타내고 있다. 그림 3.2(a)의 모드 1에서는 양의 입력전압 주기 동안 입력 필터인 리액터 L_{in} 에 입력전압 V_{in} 이 충전되는 모드이다. 리액터에 충전되는 전압 V_L 은 식(1)과 같다.

$$V_L = L \frac{di_L}{dt} \quad (1)$$



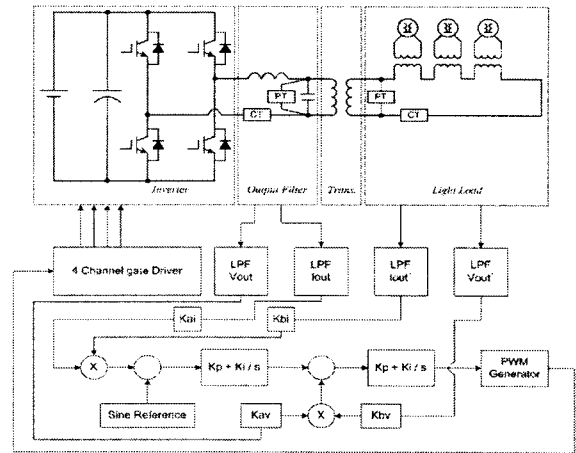
〈그림 3.2〉 승압형 컨버터의 동작 모드

전류의 경로는 $V_{in} \rightarrow L_{in} \rightarrow Q_2 \rightarrow D_2 \rightarrow V_{in}$ 이다. 그림 3.2(b)의 모드 2에서는 모드 1에서 입력 리액터 L_{in} 에 충전된 전압 V_L 과 입력전압 V_{in} 이 출력 커패시터 C_o 에 V_C 의 전압이 충전된다. V_C 은 식(2)와 같다. 전류 경로는 $V_{in} \rightarrow L_{in} \rightarrow FD_1 \rightarrow C_o \rightarrow D_2 \rightarrow V_{in}$ 이다.

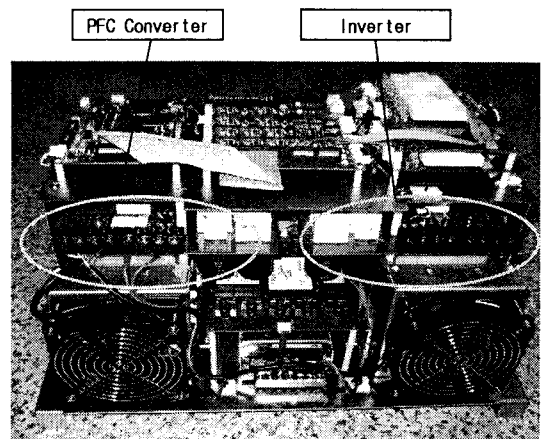
$$V_C = V_{in} + V_L \quad (2)$$

그림 3.2(c)의 모드 3에서는 음의 입력전압 주기 동안 입력 필터인 리액터 L_{in} 에 입력전압 V_{in} 이 충전되는 모드이다. 리액터에 충전되는 전압 V_L 은 식(1)과 같다. 전류의 경로는 $V_{in} \rightarrow D_1 \rightarrow Q_1 \rightarrow L_{in} \rightarrow V_{in}$ 이다. 그림 3.2(d)의 모드 4에서는 모드 3에서 입력 리액터 L_{in} 에 충전된 전압 V_L 과 입력전압 V_{in} 이 출력 커패시터 C_o 에 V_C 의 전압이 충전된다. V_C 은 식(2)와 같다. 전류경로는 $V_{in} \rightarrow D_1 \rightarrow C_o \rightarrow FD_2 \rightarrow L_{in} \rightarrow V_{in}$ 이다.

3.2 인버터의 제어회로 구성



〈그림 3.3〉 인버터형 CCR의 전류제어 다이어그램



〈그림 3.4〉 단상/3상 PFC 및 인버터의 파워스택

인버터의 전류 제어방식은 그림 3.3과 같은 전류제어 구성으로 제어할 수 있도록 하였다. 항공 등화관제용 정전류 전원장치의 특성상 주 변압기의 2차측 출력 전류 및 전압을 센싱하여 출력 부하에 무관하게 일정한 출력 전류를 발생시키기 위해 적용되도록 하였으며 보편적으로 사용되고 있는 인버터 제어 루프와 달리 내부제어 루프가 전압루프, 외부제어 루프가 전류루프로 구성되는 것이 정 전압 방식의 인버터 제어기와와의 차이점이다.

그림 3.4는 시제품으로 제작된 PFC Converter 및 인버터의 10[kW]급 전력 변환장치를 보여주고 있으며, 표 3.1은 본 논문에서 설계된 단상 및 3상 인버터의 사양을 표시하고 있다.

〈표 3.1〉 단상 PWM 인버터의 설계사양

| Parameter | | MIN | TYP | MAX | Unit |
|-------------|--------------------------------|------|-----|------|------|
| V_{IN} | Input offset voltage | 380 | 400 | 420 | Vdc |
| $I_{IN(m)}$ | Maximum Input Current | | | 36 | A |
| η | Efficiency(at full load) | 90 | | | % |
| f_s | Switching frequency | | 15 | | kHz |
| V_{OUT} | Output Voltage | 110 | 220 | 240 | Vrms |
| P_{OUT} | Output Power | 0 | | 10 | kW |
| I_{OUT} | Output Current | 19.2 | | 45.4 | A |
| V_{OVF} | Overvoltage protection voltage | 235 | 240 | 250 | V |
| I_{OCP} | Overcurrent protection | | | +1.5 | % |
| I_{UCP} | Undercurrent protection | -1.5 | | | % |
| T | Over Temperature at Heat sink | 100 | | 105 | ℃ |

이때, 인버터 출력단에 설치되는 LC 필터는 IGBT에 의해 스위칭된 교류 전원을 필터링하여 정현파 전원으로 변환하는 역할을 한다. 여기서 사용되는 인덕터 L_{out} 와 커패시터 C_{out} 은 아래와 같은 식에 의해 결정되어 질 수 있다.

$$\Delta I_{OUT} = \frac{V_L \times t_{on}}{L_{OUT}} = \frac{V_L \times D \times T_s}{L_{OUT}} \quad (3)$$

$$L_{OUT} = \frac{(V_{IN} - \sqrt{2} \times V_{OUT}) \times D}{\Delta I_{OUT} \times f_s} \quad (4)$$

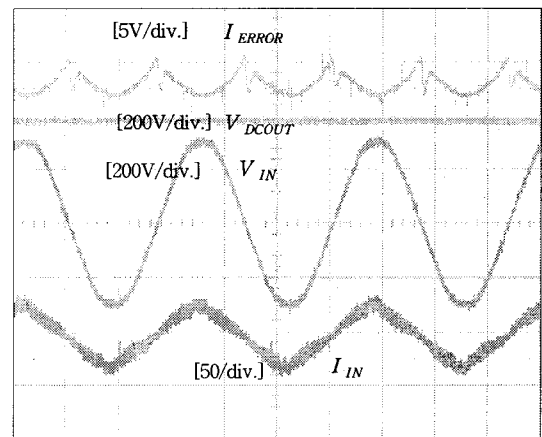
$$C_{OUT} = \frac{\Delta I_{OUT}}{8 \times f_s \times \Delta V_{OUT}} \quad (5)$$

여기서, ΔI_{OUT} 은 출력 전류의 리플크기(peak-to-peak)로 정격 출력 전류의 10[%]로 선정하고, V_L 은 출력 인덕터 L_{OUT} 양단의 최대 전압이며, D 는 평균 듀티 비율이고, T_s 는 인버터의 스위칭 주파수의 주기를 의미하고, V_{IN} 은 DC Link 입력 직류 전압의 크기, 400[Vdc]를 나타내며, V_{OUT} 는 최대 출력 전압의 실효치 220[Vac]이고, f_s 는 인버터의 스위칭 주파수 15[kHz]를 의미한다. 따라서 선정된 파라미터들을 식(3)~식(5)를 이용하여 계산하면 출력 인덕턴스는 약 0.6[mH], 출력 커패시턴스는 약

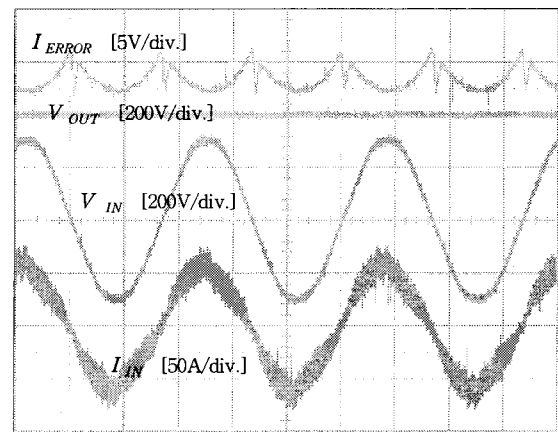
16.7[μF]으로 계산할 수 있으며, 실제의 설계적용에서는 출력 인덕턴스는 1[mH], 출력 커패시턴스는 50[μF]으로 선정 제작하였다.

4. CCR시스템의 실험결과

그림 4.1과 그림 4.2는 제작된 10[kW]급 단상 PFC 컨버터의 성능검증을 위한 실험파형이다. 이는 각각 50[%] 및 100[%]의 저항 부하조건에서 입력전류의 제어 및 역률보정을 위한 검증신호인 전류 에러 신호(I_{ERROR}), 출력 DC전압(V_{DCOUT}), AC 입력전압(V_{IN}) 및 입력 전류(I_{IN})를 각각 순서대로 나타낸 것이다. 이 파형에서 보는 바와 같이 입력전류는 입력 전압의 파형을 추종하면서 일정 출력전압을 유지하는 것을 알 수 있으며, 그 제어 특성이 양호한 것으로 나타나고 있다.



〈그림 4.1〉 50[%] 저항 부하시 PFC 입출력 파형



〈그림 4.2〉 100[%] 저항 부하시 PFC 입출력 파형

그림 4.3 및 그림 4.4는 시제품으로 제작된 10[kW]급 CCR 인버터의 50[%] 및 70[%]의 저항 부하 (6.4[A] 기준)시 각각의 전류 Step(1.6[A], 3.0[A], 4.6[A], 6.4[A])에 대한 출력 전류 파형을 보여주고 있다. 이 실험 파형에서 보는 바와 같이, 각각의 전류 Step에 대한 부하 변동

시의 출력 전류는 출력전압의 적절한 가변에 의하여 오차 범위가 설계 기준에 부합한 $\pm 1.5[\%]$ 이내에서 제어됨을 확인 할 수 있다.

5. 결 론

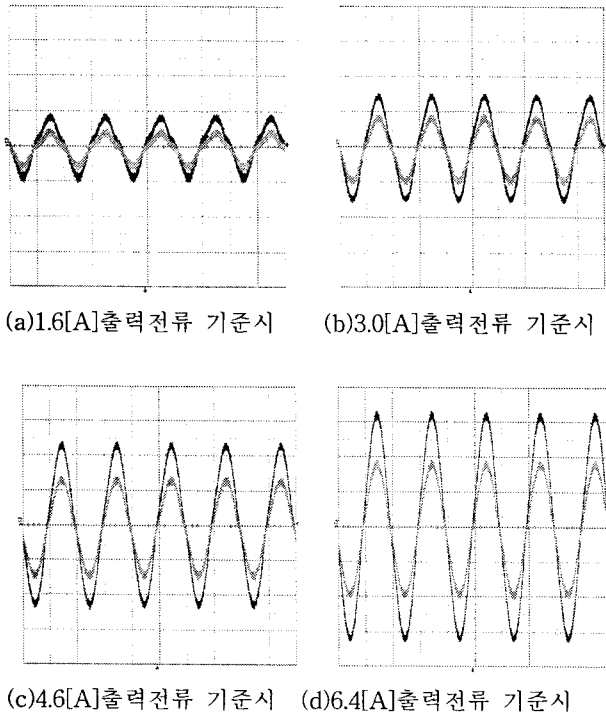
비행장 및 항공관제의 조명기구 등에 전원을 공급하기 위한 정전류 조정기(CCR)는 전원전압, 주파수, 부하용량의 변동에도 능동적으로 동작하여 직렬부하에 정 전류를 공급하는 장치이다. 기존에 설치된 대부분의 CCR시스템은 SCR 방식이었으나 최근에는 인버터형 CCR의 제품이 선진 몇몇 나라에서 출시되고 있는 실정이다. 이는 기존의 CCR가격보다 2배 이상 높은 가격으로 시장에 출시되고 있음에도 불구하고 향후 항공 등화의 추세가 기존의 할로겐 램프에서 LED로 변화되고 있는 단계에서 LED 등화 설비의 특성상 위상 정류의 입력 전원보다 정현파의 정전류에서 보다 나은 특성을 나타내고 있기에 인버터형 CCR의 선호도가 높아지고 있는 추세에 있다.

또한 기존의 SCR 방식의 CCR 경우 FAA 및 IEC와 같은 국제 규격에 부적합한 경우가 많아 국제 공항 규모의 항공 등화 설비의 정전류 전원장치로 부적합 경우가 많았으나 인버터형 CCR은 이러한 단점을 보완하고, 향후 개별 전구 감시 시스템 및 통합 항공 교통 통제 시스템에 적용하여 보다 나은 전력 품질을 보장할 수 있을 것으로 예상되기 때문이다.

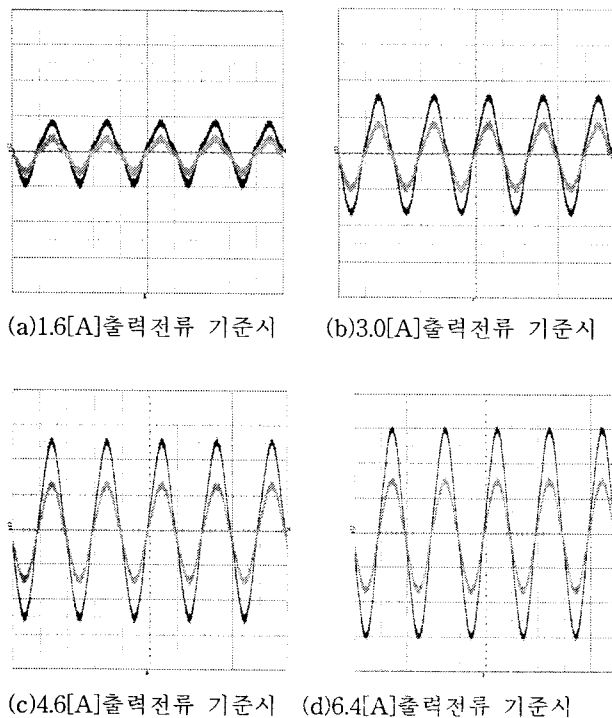
따라서 본 논문의 개발에서는 항공 등화 설비용 정 전류 전원장치를 개발하기 위해 시제품의 10[kW]급을 제작하여, 그 성능을 실험적으로 평가 수행하였으며 그 결과 만족스러운 전류제어의 성능을 확인하였다. 개발된 인버터형 CCR기술을 활용하여 향후 개별 등화 감시 제어 시스템 및 차세대 항공 교통 관제 시스템에 적용할 수 계획에 있으며, 원격 감시제어 시스템을 FAA L-827 기준으로 설계 개발하여 CCR과 연동/동작하도록 개발할 계획이다.

[참 고 문 헌]

- [1] Ying-yu Tzou and Shih-Liang Yung, "Full Control of a PWM DC-AC Converter for AC Voltage Regulation", *IEEE Trans. Aerospace and Electron. Sys.*, Vol.34, No.4, pp. 1218-1226,1998.
- [2] Duan Shanxu, Meug Yu, Xiong Jian, Kang Yong and Chen Jian, "Parallel Operation Control Technique of Voltage Source Inverter in UPS", in *Proc. IEEE PEDS'99*, pp.883-887, July 1999.
- [3] Takao Kawabata and Shigenori Higashino, "Parallel Operation of Voltage Source Inverter", *IEEE Trans. Ind. Applicat*, vol. 24, no. 2, pp. 281-287,1988.
- [4] Ramesh Srinivasan and Ramesh Oruganti, "A Unity Power Factor Converter Usin Half-Bridge Boost Topology", *IEEE Trans. Power Electron*, Vol.13, No.4, pp.487-500,1998.



<그림 4.3> 50[%]저항부하시 인버터 출력 전류/전압
[CH1-Output Current, CH2-Output Voltage,
5[A]/div.,350[V]/div.8[ms]/div.]



<그림 4.3> 70[%]저항부하시 인버터 출력 전류/전압
[CH1-Output Current, CH2-Output Voltage,
5[A]/div.,350[V]/div.8[ms]/div.]

- [5] Takeshi Uematsu, Takumi Ikeda, Noriyuki Hirao, and Shigeru Totsuka, "A Study of the High Performance Single Phase UPS", IEEE Power Electronics Specialists Conference, in Proc, IEEE PESC'98, vol.2, pp.1872-1878, 1998.
- [6] S. J. Chiang, T. S. Lee, and J. M. Chang, "Design and Implementation of a Single Phase Three-arm Rectifier Inverter", in Proc. IEE Electron. Power Applicat., vol.147, No.5, pp.379-384, 2000.
- [7] Chongming Qiao and Keyue M. Smedley, "A Topology Survey of Single-Stage Power Factor Corrector with a Boost Type Input-Current-Shaper", in Proceedings of the 2000 IEEE 15th Applied Power Electronics Conference - Volume 1 , 460-467 , 2000.
- [8] G. Zhu, H. Wei, I. Batarseh, C. Iannello, "Closed-Loop Design for Two Parallel Connected Converters with Power Factor Correction", in Proceedings of the 30th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference - Volume 2 , 698-703 , 1999.