

대용량 GTO 구동회로용 Power Supply Unit 개발

° 차재 턱 양항준 홍순옥 이학성

효성종공업(주) 기술연구소

Development of Power Supply Unit for high power GTO driver

° J.D. CHA H.J. YANG S.W. HONG H.S. LEE

R&D Institute, Hyosung Industries Co., Ltd.

Abstract

This paper describes a design and implementation of the practical SMPS (Switched Mode Power Supply) with multi-output independent regulation scheme. The designed SMPS is applied to the PSU (Power Supply Unit) of high power GTO drivers for a inverter system. In order to accomplish precise voltage regulations for both turn-on and turn-off bias voltages of the GTO driver, the conventional forward type PWM converter scheme is adopted with the Post Regulator using a Saturable Reactor. Analytic design criteria and control schemes are described for practical applications. Finally, the precise regulation of multi-output voltages is proved by experimental results.

1. 서론

대용량 전력용 반도체 소자 GTO (Gate Turn Off thyristor)는 소위 청 속도의 제한, 복잡한 구동방법 및 필수적인 스너비회로의 부가 등의 여러 가지 제약요소로 인하여 적용의 어려움을 수반한다. 따라서 비교적 구동방법이 용이하고 소위 청 속도의 제한도 수십 KHz 대의 상승이 가능한 IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)의 대용량화 연구가 국내외에서 가속화되고 있는 추세이다. 그러나 현재 '교류차량 시스템' '무효전력 보상장치' 등 대용량 (수백 KVA 이상)의 전력변환 장치에는 아직도 GTO 가 대부분을 점유하고 있는 실정이며 향후 수년간은 GTO 의 응용이 지속되리라 판단된다. 한편 국내의 GTO 응용기술은 아직 초기단계에 머무르고 있어서 GTO 구동회로, 전원장치, Power Stack 등을 대부분 수입에 의존하고 있는 현실이므로 GTO 구동회로 및 이에 필요한 1/2차축간의 고전압 절연, 안정화된 다 출력전원 등을 만족하는 Power Supply Unit 의 개발이 요구된다.

본 논문에서는 대용량 GTO (3,300V 1,000A) 구동회로용 PSU (Power Supply Unit) 를 설계 구현하였다. 전력변환방식은 일/출력 절연이 가능하고 다 출력이 용이한 Forward 형으로 선택하였으며, 두 개의 출력전압 안정제어가 가능한 Post Regulator 를 적용하였다. 제작 실험을 통하여 일/출력간의 고전압 절연을 실현하고, 두 개 출력전압의 양호한 Regulation 특성을 확인하였다.

2. GTO 구동회로와 PSU 특성

그림 1. 에는 GTO 구동회로와 PSU 의 블록도가 나타나고 있으며, 제이회로 블록의 논리조합으로 제어하여 GTO 의 turn-on 전류, turn-off 전류 그리고 on-state 전류의 사이렌스를 조정한다[1]. 즉 GTO 의 turn-on 을 위하여 VPI 전원측의 SB 1 을 on 하여 순간적인 pulse 전류가 흐르게 하고, on 상태로 되면 그 상태를 유지하는 on-state 전류를 지속적으로 흐르게 하기 위하여 주 제이터프에 가포화 리액터를 사용하여 변압기 1차측에서 전압제어가 가능한 Post Regulator 를 적용하였다. 제작 실험을 통하여 일/출력간의 고전압 절연을 실현하고, 두 개 출력전압의 양호한 Regulation 특성을 확인하였다.

따라서 GTO 구동회로용 PSU 는 안정화된 Positive, Negative 전원이 필요하며 특히 GTO 를 turn-off 하기 위한 Negative 전원의 안정성이 중요하다. 또한 일/출력간의 절연내압은 GTO 가 적용되는 시스템의 dc 링크전압의 2배 이상을 요구하므로 적절한 변압기설계와 optic isolator 의 선정도 고려되어야 한다.

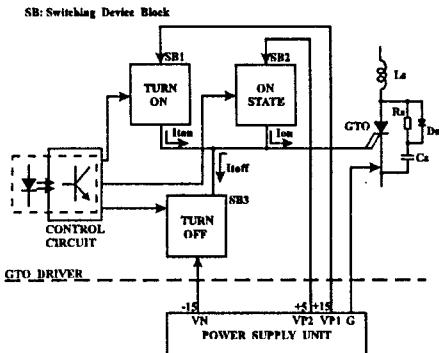


그림 1. GTO 구동회로와 PSU

3. GTO 구동회로용 Power Supply

3.1 Forward PWM 컨버터회로 및 동작

Forward 형 컨버터는 PWM 전원회로 Topology 의 기본이 되는 buck 형에서 유추된 것으로써 변압기 가 적용되어 1/2차측의 절연을 실현하는 회로이다[2]. 그 회로도는 그림 2.에 나타나며 스위치가 turn-on 되면 I_p 가 흐르기 시작하여 변압기 1차측을 차시시키고 이 에너지는 변압기 2차측을 통하여 D_1 을 지나서 필터 L_F 에 쌓이게 된다. 그 후 스위치가 turn-off 되면 변압기 1차측과 입력전압간의 회로망이 끊기게 되며, 따라서 변압기 1차측에 쌓인 에너지가 방출할 투우프가 존재하여야 하므로 Reset 권선이 필수적이다. 즉 변압기 1차측의 에너지가 Reset 권선을 통하여 입력전원 라인측으로 회생하게 된다. 한편 이 때 2차측의 회로망은 D_1 이 Blocking 되고 D_2 가 도통되어 필터 L_F 의 에너지를 Freewheeling 하게 된다.

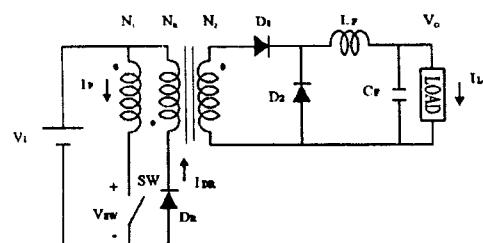


그림 2. Forward 컨버터 회로

그림 3.에 Forward 컨버터 각 부분의 동작파형이 나타나고 있다. SW 가 turn-off 하면 스위치 양단 전압 V_{SW} 는 초기에 On 상태에서 저장하고 있던 변압기 1차측의 에너지로 인하여, 입력전압의 두배

가 인가되므로 소자의 내압 결정에 고려되어야 하며, Reset 권선 전류 I_{DR} 은 변압기의 편자현상으로 인한 포화를 방지하기 위해 Off 시간 내에 0 으로 되도록 변압기 1차측과 Reset 권선의 권수비를 설계하여야 한다. 그리고 이 컨버터의 제어는 널리 알려진 PWM 방식(TL494)으로 구현한다[2][3].

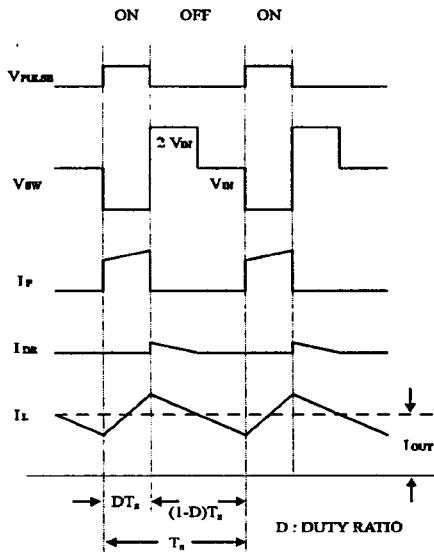


그림 3. Forward 컨버터 각 부문의 동작파형

3.2 가포화 리액터 (SR : Saturable Reactor) 를 사용한 Post Regulator

3.2.1 가포화 리액터의 특성 및 제어

일반 리액터와 상이하게 가포화 리액터는 리액터의 포화특성을 사용하여 전력용 반도체 소자와 같은 스위치 동작을 하도록하여 컨버터를 제어한다. 따라서 리액터코아의 B-H 특성곡선은 Square Hysteresis Loop ($dB/dH \approx \infty$) 를 가지며 Hysteresis Loop 면적이 작고 최대 자속밀도 B_m 이 높은 것으로 선택한다[3][4].

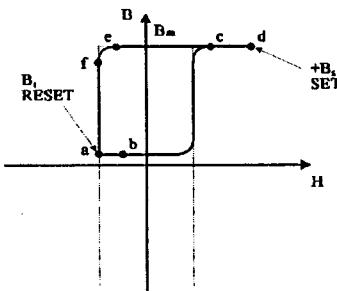


그림 4. Square Hysteresis Loop 를 갖는 B/H 특성그래프

그림 4. 의 Square Hysteresis Loop 에서 확인할 수 있듯이 포인트 ⑥ → ⑤로 이동하는 시간동안은 가포화 리액터가 High Impedance 상태가 되며, 포인트 ④에서 코아가 포화되어 Zero Impedance 상태가 된다. 즉 스위치가 On/Off 동작을 하는것과 동일한 효과를 얻을 수 있다. 따라서 B_1 (RESET) → $+B_S$ (SET) 로 이동하는시간이 가포화 리액터의 Off-time 이 되는것이므로, 결국 B_1 의 레벨을 조절함으로써 가포화 리액터의 Off-time 을 변화시켜 컨버터의 제어를 구현할 수 있다.

3.2.2 회로 및 동작과정

가포화 리액터가 적용된 Forward 컨버터 회로도와 그 동작파형이 그림 5. 에 나타나고 있다. 가포화 리액터는 변압기 2차측과 정류 다이오드부 사이에 직렬로 연결되어 전달되는 전압의 필스폭을 조정하는 역할을 한다. 즉 컨버터의 1차측으로의 제어투우프와 무관하게 2차측만의 독립적으로 하나의 제어투우프가 형성되어 I_C 를 제어함으로써 출력전압의 안정화를 구현할 수 있다.

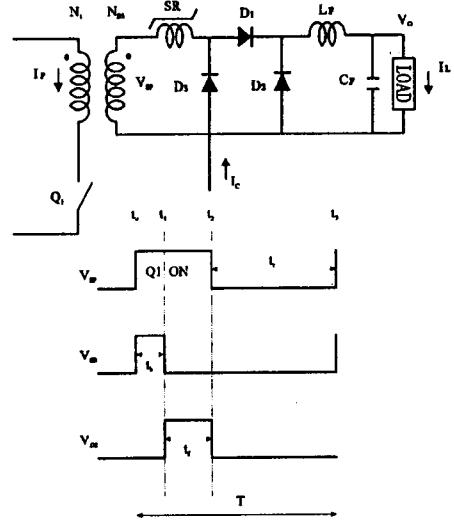


그림 5. 가포화 리액터가 적용된 Forward 컨버터 회로도 및 동작파형

SET 과정

처음 t_0 에서 그림 4. B-H 특성곡선 B_1 (포인트 ⑥)의 위치에 있다. 이 때 컨버터의 스위치 Q_1 이 turn-on 되어 변압기 2차측 전압은 $V_{SP} = V_{DC} (N_{SS}/N_1)$ 이 되고, 회로양은 변압기 2차측, SR, D_1 , LC 필터로 형성되므로 SR은 포화점(포인트 ⑤)으로 향하여 이동하기 시작한다. 이 포화점(포인트 ⑥)으로 이동할 때까지 SR, D_1 , D_2 를 통하여 강제전류가 흐르며 이 전류는 D_2 의 Freewheeling 전류보다 아주 미소한 양이므로 D_2 는 계속 도통상태에 있다. 즉 SR 의 Blocking Phase 는 그림 5. 의 $t_0 \leq t_b \leq t_1$ 동안의 Off-time이며 그림 4. 의 B_1 (RESET) → $+B_S$ (SET) 로 이동하는 시간을 나타낸다.

일단 포인트 ⑤에 도달하면 SR의 Impedance는 수 nano sec 내에 Zero로 되어 스위치 On 상태가 되어 V_{D2} 는 Q_1 의 On-time 까지의 V_{SF} 가 그대로 나타나게 된다. 결국 dc 출력식은 다음과 같다.

$$V_O = (V_{SP} - V_{D1}) \frac{I_L}{T}, (t_1 \leq t_f \leq t_2) \quad (3-1)$$

한편 SR 의 Blocking Phase t_b 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$t_b = N_m A_e \frac{(B_S - B_1)}{V_{SP}} 10^{-8} \quad (3-2)$$

N_m : SR Turns 수, A_e : SR Core Area

B_S : 포화 자속밀도, B_1 : 초기 자속밀도 레벨

RESET 과정

SR은 Q_1 의 On-time 끝점과 그 다음 Turn-on 되기 이전에 Hysteresis Loop 는 B_1 (포인트 ⑥)으로 RESET 되며, 전류 RESET 기법을 사용하여 적당한 B_1 의 레벨로 조정 가능하다. V_{SF} 는 Q_1 이 OFF 한후 구간 $t_2 \leq t_r \leq t_3$ 동안 부의 값을 가지며 D_1 이 Blocking 하고 D_2 가 Freewheeling 하므로 D_3 는 이 구간동안만 도통하게 되어 RESET 레벨 제어전류 I_C 가 흐르게 된다. 즉 I_C 가 변압기 2차측 N_{SS} 측으로 흐르게 되므로 I_C 가 증가하면 결국 초기 자속레벨 B_1 을 내리는 효과가 있게 된다.

전류 RESET 기법을 사용한 전압 레귤레이션 회로도가 그림 6.에 나타난다. 출력전압 V_O 가 증가하면 포인트 (B) 전압이 내려가고, 따라서 Q_1 의 V_{EB} 가 커지게 되므로 I_C 가 증가하여 초기 자속레벨 B_1 을 내리는 효과를 얻을 수 있다.

즉 B_1 (RESET) → $+B_S$ (SET) 로 이동하는 시간이 증가하는 의미가 되어 SR의 Blocking Phase (그림 5. 의 $t_0 \leq t_b \leq t_1$ 구간) 가 증가하여 결국 출력전압 V_O 를 내리는 효과를 얻을 수 있게된다. 출력전압 V_O 가 감소하면 상기내용의 반대의 원리로 출력전압 V_O 를 레귤레이션시킬 수 있다.

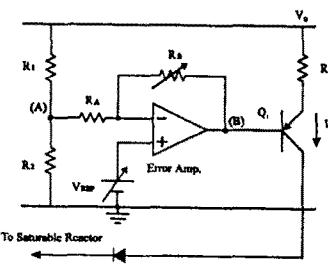


그림 6. 진압 레귤레이션 회로도

3.3 전력부 설계

본 GTO (GPS DG406 BP30,GEC) 구동회로용 PSU의 설계사양은 다음 표 1. 과 같다.

구 분	내 용
전력변환방식	Forward 방식
제어방식	PWM 제어, 가포화 리액터 제어
입력전압	ac 110V±20% (dc 125V~187V)
출력전압	+15V 2A, -15V 5A, +5V 3A
스위치주파수	50kHz
출력용량	120W
1/2자주 절연내압	ac 5.000V 1분간

표 1. GTO 구동회로용 PSU의 설계사양

3.3.1 주변압기

변압기 코아의 재질은 PC30 (종래 H_7C_4), PQ 형으로 선정하였다. 본 컨버터의 설계용량이 120W 이므로 PQ3230 설계가 가능했지만 절연내압을 강화하기 위하여 절연지를 1/2자주 권선간에 삽입해야 하므로 공간확보를 위하여 PQ4040 으로 결정하였다[3]. 동차시비율을 고려하여 설계된 각 부분의 권선수는 표 2.에 나타난다.

구 분	N_1	N_R	N_{BIAS}	$N_{2,+5V}$	$N_{2,+15V}$	$N_{2,-15V}$
권선수	36 T	30 T	4 T	6 T	14 T	12 T

표 2. 주변압기 권선수

그림 7. 은 주변압기의 권선 단면도를 나타내며 N_1, N_R 의 1/2 Turns 를 권선한 후 N_{BIAS} , $N_{2,+5V}$, $N_{2,+15V}$, $N_{2,-15V}$ 의 순서로 권선하고 N_R, N_1 의 1/2 Turns 를 최종적으로 권선하는 Sandwich 권선방법을 사용하였다.

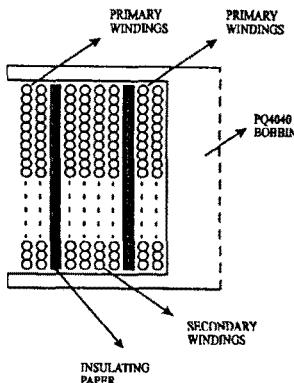


그림 7. 주변압기의 권선 단면도

3.3.2 가포화 리액터 설계

각 t_b 와 t_f 를 $2\mu sec \leq t_b \leq 6\mu sec$, $0 \leq t_f \leq 4\mu sec$ 로 결정하고 식 (3-1) 로부터

$$V_{SP} = V_o \frac{T}{t_f} + V_{DI} \approx 26V \quad (3-3)$$

Maximum Blocking time $6\mu sec$ 를 고려하여 적어도 이 시간 동안 26V 를 Blocking 할 수 있도록 SR 의 권선수를 구한다. 코아는 앞에

서 언급된 SR 의 특성을 만족할 수 있는 MB 18×12×4.5 Amorphous 코아를 선정하였다[4].

3.3.3 필터용 인더터

필터용 인더턴스의 설계는 컨버터의 과도응답 속도, 불연속모드 동작 등에 중요한 영향을 미치게 되며, 불연속모드 동작으로 인한 경부화 상태에서의 출력전압 상승을 방지하기 위한 더미저항 설계에도 고려되어야 한다.

$I_{O MIN} = I_{L AVG}$ 스위칭주기 T_S , 출력전압 V_O , 최소시비율 D_{MIN} 이 결정되면 식 (3-4) 로부터 필터용 인더터의 인더턴스를 구할 수 있으며, 각 출력의 인더턴스 값이 표 3.에 나타나고 있다.

$$L = \frac{V_O (1 - D_{MIN}) T_S}{2 I_{O MIN}} \quad (3-4)$$

구 分	POST REGULATOR +5V 단	VOLTAGE REGULATOR +15V 단	PWM CONTROL -15V 단
$I_{O MIN}$	0.15A	0.2A	0.5A
$I_{O MAX}$	3A	2A	5A
인더턴스	250uH	650uH	225uH
더미저항	30 OHM, 0.82W 이상	82 OHM, 3.6W 이상	30 OHM, 7.5W 이상

표 3. 출력단의 필터 인더턴스 및 더미저항

3개의 출력단의 인더터 코아는 PQ3230 을 선택하였으며 각각의 최대 전류가 허리도 포화가 되지 않도록 Gap 과 AT (Ampere Turn) 을 고려하여 설계하였다. (첨부 1. 참조)

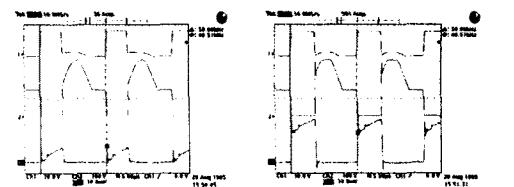
4. 제작 실험

4.1 제작 실험

상기 3 질의 설계를 기초로 120W Forward 형 Switched Mode Power Supply 를 제작 설립하였으며 이의 전체회로도가 논문 후단에 첨부된다. (첨부 1. 참조)

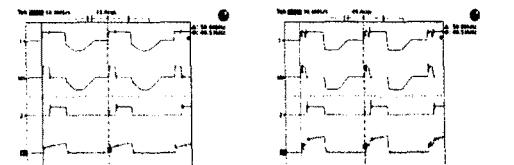
4.1.1 회로 각 부분의 실험파형

다음 그림 8.은 부하변동에 따른 각 부분의 파형이며 이 때 출력전압/전류의 상태가 나타나고 있다.



(1) $V_{+15V} \rightarrow 15.35V, 0.10A$ (2) $V_{+15V} \rightarrow 15.35V, 0.10A$
 $V_{+5V} \rightarrow 5.00V, 1.00A$ $V_{+5V} \rightarrow 5.00V, 1.00A$
 $V_{-15V} \rightarrow -15.00V, 0.10A$ $V_{-15V} \rightarrow -14.99V, 1.00A$
 $V_{CS} (10V/div)$, $V_{DS} (100V/div)$, $I_{DS} (2A/div)$

(a) Forward 컨버터 부분 (-15V 출력재이시)



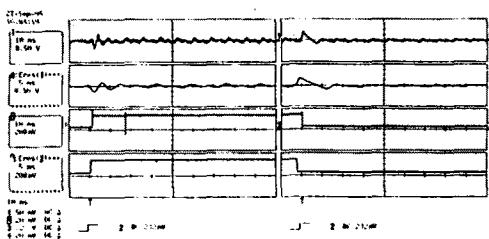
(1) $V_{+15V} \rightarrow 15.35V, 0.10A$ (2) $V_{+15V} \rightarrow 15.35V, 0.10A$
 $V_{+5V} \rightarrow 5.00V, 0.50A$ $V_{+5V} \rightarrow 5.00V, 5.00A$
 $V_{-15V} \rightarrow -15.00V, 1.00A$ $V_{-15V} \rightarrow -14.99V, 1.00A$
 $V_{SF} (50V/div)$, $V_{SR} (50V/div)$, $V_{D2} (50V/div)$, $I_{DS} (5A/div)$

(b) 2차측 Post Regulator 부분 (+5V 출력재이시)

그림 8. Forward 컨버터 각 부문의 실험파형($t=5\mu sec$)

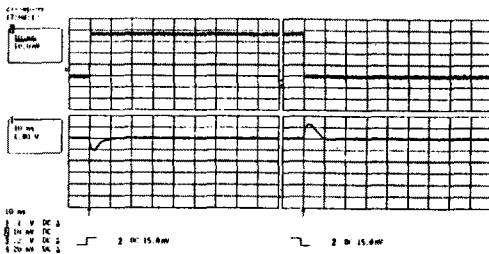
4.1.2 과도상태 출력파형

각 출력단의 과도응답이 그림 9. 10. 에 나타나고 있다.



(상) 출력전압 : ① 0.5V/10ms, ② 0.5V/5ms (고해상도)
 (하) 출력전류 : ③ 2A/10ms, ④ 2A/5ms (고해상도)

그림 9. Step 부하시 ($i_o=1A \leftrightarrow 5A$) -15V 출력파형

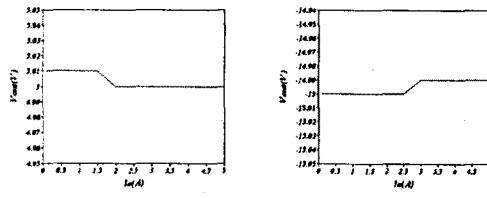


(상) 출력전류 : 1A/10ms (고해상도)
 (하) 출력전압 : 1V/10ms (고해상도)

그림 10. Step 부하시 ($i_o=1A \leftrightarrow 5A$) +5V 출력파형

4.2 Regulation 특성

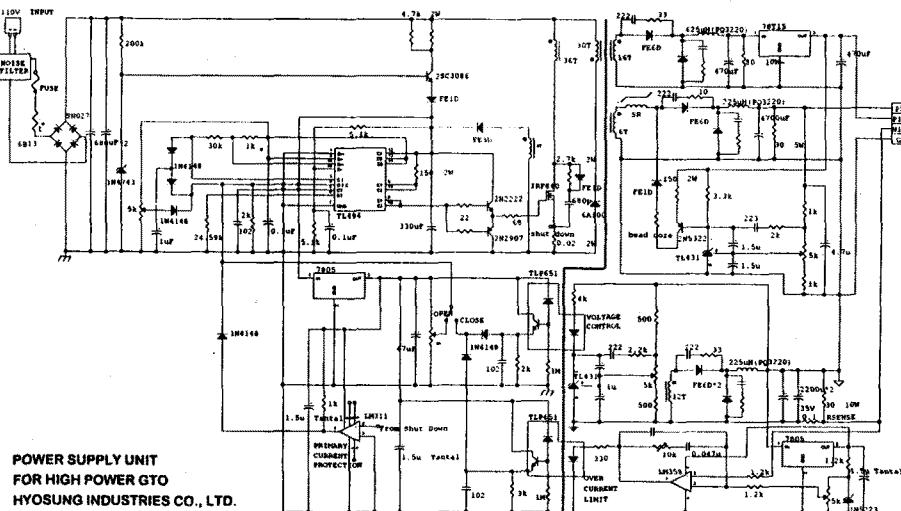
그림 13. 은 가포화 리액터를 사용한 +5V 부와 PWM 제어 -15V 부의 부하변동에 따른 전압 Regulation 특성을 나타내고 있으며 특성이 양호함을 확인 할 수 있다.



(a) +5V 출력
 (b) -15V 출력
 (15.35V 0.10A, -14.99V 2.50A) (15.35V 0.10A, 5.00V 1.00A)

그림 11. 부하변동에 대한 출력전압 특성

첨부 :
 Power
 Supply
 Unit 도면



4.3 실제작 PSU 외형사진 (실제크기 : 240mm×169mm)

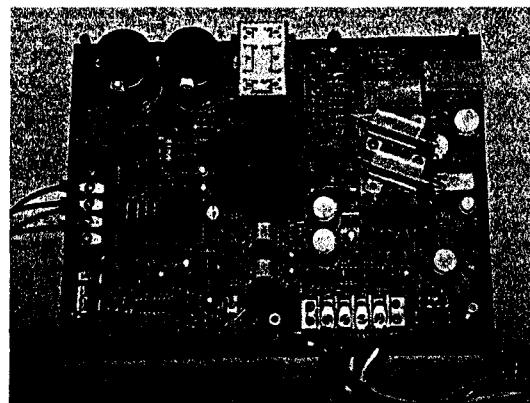


그림 12. 실제작 PSU 외형사진

5. 결론

대용량 전력용 스위칭 반도체소자 GTO 의 구동회로 전원으로써 1/2 차축간의 고전압 절연, 안정화된 다출력 전원 등을 만족하는 POWER SUPPLY UNIT 를 설계/제작하였다. 절연용 변압기는 고압 절연시험을 완료하였고, 다 출력 전압 regulation 을 구현하기 위하여, PWM 제어방식과 가포화 리액터를 제어하는 Post Regulator를 적용하였으며, 최종적으로 GTO 구동회로와 연결하여 GTO Power Stack 1-pole 구동시험을 통하여 양호한 동작특성을 확인하였다. 또한 당시에 연구중인 견인진동기 구동용 400KVA급 VVVF 추진장치에 소요되는 20대의 PSU 가 제작 완료된 상태이다.

한편 국내외 기업과 대학의 GTO 응용기술은 아직 초기단계에 머무르고 있어서 GTO 구동회로, 전원장치, Power Stack 등을 대부분 수입에 의존하고 있는 현실이므로 GTO 구동회로와 전원장치의 개발은 필수적이며 본 연구개발의 결과로 가격은 수입품의 약 50% 정도로 절감되어 수입대체의 이점이 있다고 사료된다. 또한 지속되는 GTO 의 응용에 부합하기 위하여 구동회로의 개발도 이루어져야 하며, GTO 의 용량에 따라 구동회로의 전원용량도 증감하므로 본 개발을 토대로 스위칭주파수증가, 제어특성 개선 등의 과제를 지속적으로 연구 보완하면서 PSU의 시리즈화 방향으로 나아가야 할 것이다.

6. 참 고 문 헌

- [1] N. Mohan, T. Undeland and W. Robbins, *Power Electronics : Converters Applications & Design*, John Wiley & Sons, 1989.
- [2] 김 회 준, 스위칭 모드 파워 셀룰라이, 성안당, 1995.
- [3] 長谷川, スイッチングレギュレータ設計ノウハウ, CQ 出版社, 1995.
- [4] Abraham I. Pressman, *Switching Power Supply Design*, McGraw Hill, 1992.