Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society
Vol. 15, No. 11 pp. 6821-6829, 2014

http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2014.15.11.6821
ISSN 1975-4701 / eISSN 2288-4688

고내압 FET 테스트 장비용 전원공급장치 개발

박대수[1], 오성철[1*]
[1]한국기술교육대학교 전기전자통신공학부

Development of Power Supply for High-voltage FET Test

Dae-Su Park[1], Sung-Chul Oh[1*]
[1]Korea University of Technology and Education, School of Electrical, Electrics and Communication Engineering

요 약 자동차에서 반도체 소자의 사용이 증가하고 있으며 특히 친환경자동차의 구동장치 부품으로서 고내압 스위칭 사용 증가가 예상된다. 그러나 고내압 소자의 경우는 신뢰성 시험을 하기 위한 장비가 국산화 되어 있지 않다. 그러므로 고내압 소자를 시험하기 위한 전원장치의 개발을 위하여 관련 시험규격을 분석하였다. 특히 자동차용 반도체 신뢰성 시험을 위한 AEC(Automotive Electronic Council) Q101에서 시험항목을 분석하여 개발이 필요한 전원장치의 사양을 결정하였다. 주회로는 풀브리지 컨버터로 선정하였으며 주어진 장치 사양에 따라 각종 변수를 설계하였고, 회로 변수의 적절성은 시뮬레이션을 통하여 검증하였다. 또한 전력부의 병렬운전. 패턴 운전을 위한 인터페이스를 설계하였다. 이를 통해 개발된 제품은 시험을 통하여 특성을 검증하였다.

Abstract The use of semiconductor devices as a component of eco-friendly motor vehicles has increased and their widespread use as high voltage switches is expected. On the other hand, in the case of high-voltage switches, reliability test equipment is not localized. To test high voltage switches, this paper analyzed the relevant test standards for developing power supplies. In particular, for the automotive semiconductor reliability test, the AEC (Automotive Electronic Council) Q101 was analyzed. Based on that, the standard specifications of the power supply were determined. For the main power circuit, the pull bridge converter was adopted and based on the specification, the circuit parameters were determined and verified by simulation. The interface for the parallel and pattern operation was designed. The characteristics of the power supply were tested.

Key Words : High voltage power supply, Power voltage semiconducter, Reliability test

1. 서론

최근 세계적으로 석유자원 고갈, 지구 온난화 등 유한한 자원과 환경보호라는 글로벌 명제아래 자동차 업계에서도 이러한 환경 문제는 예외일 수가 없어 여러 방안들이 나오고 있다. 과거에는 석유 자원을 절감하는 차원에서 연비 개선에 노력을 기울여왔다면 현재에는 가솔린를 쓰지 않는 기술을 개발하는데 초점을 맞추고 있다.

이러한 연구의 결과는 가솔린 에너지와 전기 에너지를 복합해서 사용하는 하이브리드 자동차와 전기에너지만 사용하는 전기자동차로 개발이 진행되고 있다.

이러한 하이브리드 및 전기자동차의 개발에 따라 전력용 FET 개발의 필요성이 대두되었고, 국내에서도 고내압 FET 등이 연구 개발되고 있다. 또한 자동차 설계 및 제조 공정에서 반도체가 차지하는 비중이 늘어남에 따라 그와 관련된 불량도 증가할 수밖에 없는 실정이다.

따라서 이러한 불량을 없애기 위해서는 신뢰성 검증이 완료된 반도체를 자동차 제조에 사용해야 하기 때문

*Corresponding Author : Sung-Chul Oh(Korea University of Technology and Education)
Tel: +82-10-2415-95317 email: scoh@koreatech.ac.kr
Received April 9, 2014 Revised (1st July 10, 2014, 2nd September 29, 2014, 3rd October 29, 2014, 4th November 5, 2014) Accepted November 6, 2014

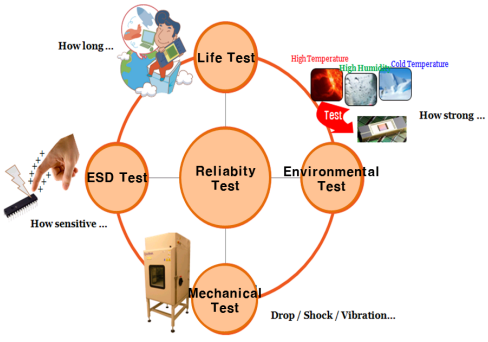
에, 반도체의 품질이나 신뢰성 강화 요구로 AEC에서는 반도체 신뢰성 평가를 위한 국제 규격을 별도로 마련하게 되었다. 그러나 차량용 반도체, 특히 고내압 FET 반도체에 대한 신뢰성 평가를 위해서는 해외에서 설비를 도입하여 평가를 진행해야 했다.

본 논문에서는 기존의 챔버를 이용하여 시험을 위한 고압 전원장치를 개발하고자 하였다. 특히 자동차용 반도체 신뢰성 시험을 위한 AEC Q101에서 시험항목을 분석하여 개발이 필요한 전원장치의 사양을 결정하였고, 주회로 방식과 인터페이스 방식 등을 설계 하였다.

2. 본론

2.1 신뢰성 시험 관련 규격

제품을 출시하기 전에는 반드시 품질인증시험(Qualification Test)를 거쳐 신뢰성을 검증해야하며, 이러한 시험에는 Fig. 1과 같이 수명시험, 환경시험, 정전기 시험, 기계적인 시험이 있으며 어떠한 시험 조건에서도 한 개의 불량이라도 발생이 되면 제품을 시장에 판매를 할 수가 없게 된다.



[Fig. 1] Reliability test item

반도체 부품이 가전제품, 휴대용제품 그리고 일반 산업 분야에 사용되면서 시스템반도체의 기능이 점점 업그레이드 되었고 산업용 부분에서도 인명과 직결이 되는 자동차 분야에도 점점 반도체가 탑재되기 시작되면서 차량용 반도체 규격에 대한 필요성이 대두되어 1992년도에 AEC 협회가 창설되었으며, 1994년도에 AEC Q100을 제정하였고, 1996년도에는 AEC Q101 / Q200 규격을 발표하게 되었다.

2.2 전원장치 사양

일반적으로 AEC Q101에서 요구하고 있는 시험은 정 바이어스를 걸어 전류를 규격이 보장하는 값까지 흘려서 시험을 하는 것이 아니라 역 바이어스를 인가하여 부품의 항복현상을 보는 것이기 때문에 전원공급 장치의 구성의 전류보다는 전압 공급 능력에 초점을 맞추어 개발을 할 필요가 있다고 판단되었다.

규격에 따른 MOSFET의 내구성 평가 시험 항목인 HTRB(High Temperature Reverse Bias)과 HTGB(High Temperature Gate Bias) 시험을 위하여 전원장치 사양을 각각 1000V/10A, 150V/10A로 결정 하였다[1].

물론 IOL(Intermittent Operating Life Test)과 같이 정 바이어스를 인가하여 동작 전류를 흘려서 제품의 수명을 검증하는 시험도 있으나 이 시험 또한 부하전류를 계속 흘리는 시험이 아니라 접합 온도를 일정한 온도까지 상승시키는 값만이 필요하기 때문에 공급전류량도 많지 않다고 판단이 되었으며, IOL 시험을 위해서 필수적인 ASQ(오토 시퀀스) 기능을 추가하였다.

따라서 현재 시장에서 개발되고 있는 제품의 동향을 볼 때 수백 V ~ 천 V 정도의 공급 능력만 갖춘다면 충분히 국내에서 개발되는 제품에 대한 신뢰성 시험을 할 수 있다.

또 향후에는 고내압 FET가 모듈화 되어 단품보다 더 큰 용량을 가진 IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)가 개발되기 때문에 현재 개발된 장치보다 더 향상된 전원공급 장치 개발이 필요할 것이다.

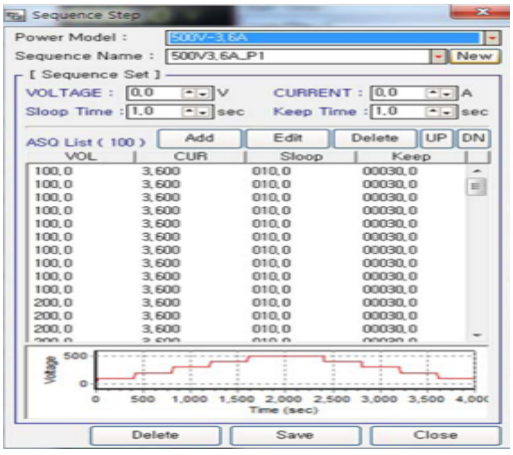
본 논문은 현재 단품 레벨에서의 신뢰성 시험이 가능한 수백 V정도의 전원을 공급할 수 있는 장치를 개발하는 것이 목적이며, 적용될 반도체의 내압과 시험항목을 바탕으로 개발될 전원장치의 사양을 결정하였다. 사양은 Table 1과 같다.

[Table 1] Power supply specifications

Article	Specification
	150V/10A
Input voltage range	220V, Single phase ±10%, 60Hz
Output voltage	150V
Output current	10A
Maximum output power	1kW
Output current stabilization rate	1% (Measured after 30 minutes of operation)
Output noise voltage	Less than 1%

2.3 ASQ 설정

ASQ란 오토 시퀀스로써, 미리 정해진 순서 또는 일정한 이론에 의해 정해지는 순서에 따라, 제어의 각 단계를 차례차례 추진해나가기 위한 시퀀스 설정이다.



[Fig. 2] ASQ edit

[1] Power Model

여러 종류의 전원공급장치 사용시, 설정이 필요한 전원공급장치 설정이다.

[2] Sequence Name

설정된 시퀀스나 새로운 시퀀스 설정이다.

[3] Sequence Set

Step별 전압/전류/Sloop시간/유지시간 설정이다.

- ADD : Step 추가
- Edit : 설정된 Step을 선택하여 설정된 상태를 수정
- Delete : 불필요한 Step을 선택하여 삭제
- Up/Dn : Step의 순서를 변경

[4] Delete

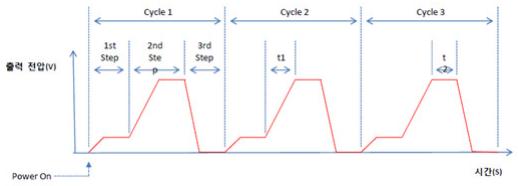
현재 선택된 시퀀스를 삭제한다.

[5] Save

현재 수정 및 설정하고 있는 시퀀스를 저장한다.

[6] Close

설정 종료한다.

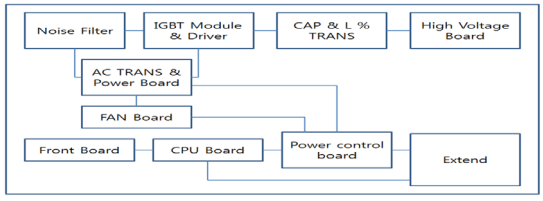


[Fig. 3] ASQ edit waveform

2.4 전원장치 설계

2.4.1 전원공급 장치

전원공급 장치의 구성도는 Fig. 4와 같으며 각 부분의 기능은 다음과 같다.



[Fig. 4] Power supply block diagram

[1] 노이즈 필터

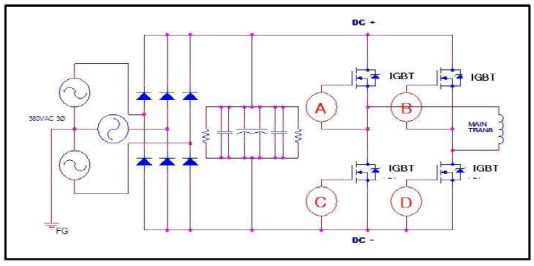
노이즈는 크게 정상 모드 노이즈와 공통 모드 노이즈로 구분되며, 정상 모드 노이즈는 신호나 송전선에 대한 것이고, 공통 모드 노이즈는 GND에 대한 것이다. 정상 모드 노이즈를 제거하기 위해 바이패스 콘덴서로 라인 양 옆에 콘덴서를 달았다. 공통 모드 잡음을 제거하기 위해서는 초크 코일을 사용하였다.

이 코일은 정상 모드 전류에 의해 발생하는 자속은 서로 상쇄시켜 인덕턴스를 억제하고, 공통 모드 전류에 의해 발생하는 자속은 서로 합쳐져서 큰 인덕턴스를 만드는 구조로 되어 있으며, 이 부분은 AC 입력이 단락 또는 과전압이 입력될 경우 자동으로 차단하는 역할을 한다.

[2] IGBT 모듈 & 드라이버

기존 스위칭 반도체인 트랜지스터는 가격이 저렴한 대신 회로 구성이 복잡하고 동작 속도가 느린 반면에 MOSFET는 저전력이고 속도가 빠른 대신에 가격이 비싼 단점이 있다.

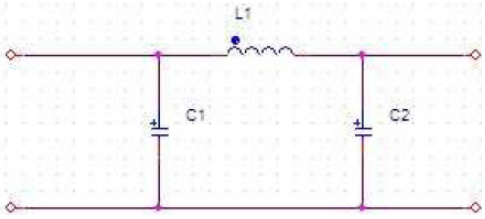
IGBT는 이 두 제품의 장점만을 결합한 제품으로 고속 스위칭 소자이다. IGBT를 사용하면 전업 파형이 안정되고 전류 특성이 좋아진다. Fig. 5는 IGBT 모듈 구성도이다. AC 입력단을 고속으로 스위칭하는 모듈이다.



[Fig. 5] AC/DC, DC/high frequency AC converter circuit

[3] CAP & L % 변압기

IGBT에서 들어온 AC 전원을 DC 전원으로 변환시켜 주는 모듈이다. Fig. 6과 같이 CAP 입력형 CL회로로 CAP와 L에 의해 고주파 성분이 차단되고 직류 성분만 출력이 된다.



[Fig. 6] smoothing circuit

[4] 고압보드

CAP & L & 트랜스에서 들어온 DC 전원을 고압으로 변환하고 전압을 저장하는 보드이다. 신뢰성 시험을 진행할 때 사용하는 전압은 이 보드에서 나오게 된다.

[5] 교류 변압기와 전력 보드

Fan Board, Front Board, CPU Board, Power Control Board를 구동시켜주는 보조 전원이다.

[6] FAN Board

배전반에서 파워 내부에서 열이 발생하는 신호를 받아서 공랭식 팬을 구동시켜 주는 모듈이다.

[7] 전면 보드

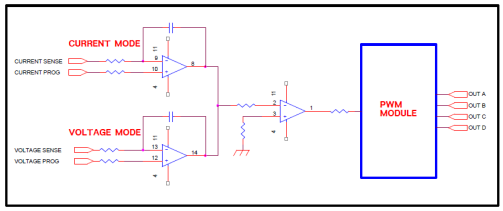
전면에서 전원를 제어할 수 있는 디스플레이 모듈로 현재의 출력 전압과 전류를 표시하며, 수동으로 전면에서 전원의 출력 전압 조절 및 온/오프 제어와 통신모드 설정을 할 수 있으며, 주 전력을 온/오프 할 수 있는 보드다.

[8] CPU 보드

전원장치의 전압을 검출하여 출력 전압을 비교/판단하여 출력 전압 상태를 제어 보드로 보내주는 모듈이다. RS232(RS485) 블록은 컴퓨터와 전원장치 간의 통신을 담당하고 있으며, 여러 대의 전력부를 연결할 경우, 각각의 전력부 ID를 부여하여 컴퓨터가 제어를 하게 된다.

[9] 전력제어 보드

Fig. 7은 전력제어 보드의 구성이며, CPU와 RS232 블록에서 들어온 전력의 입력 상태와 전력 모듈의 출력 전압과 전류 센서 상태를 비교하여 전력 모듈을 PWM으로 제어하게 된다.



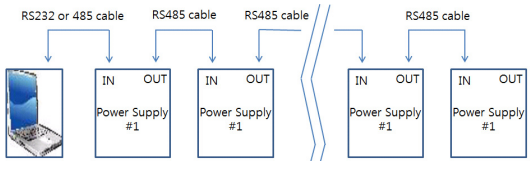
[Fig. 7] Power Control Board

[10] 확장

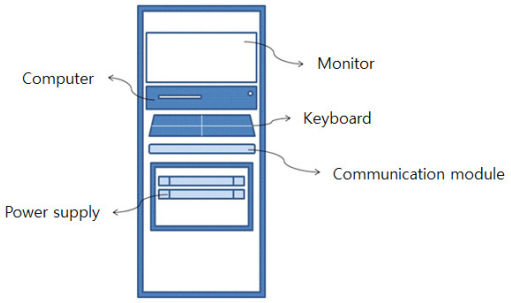
외부에서 제어할 수 있는 RS232/485 신호를 CPU & RS232 블록으로 전달해주는 모듈이다. Table 2와 Fig. 8은 모듈의 사양과 확장을 나타내며, Fig. 9는 외부에서 제어 할 수 있는 RS232/485 신호를 CPU&RS232 BLOCK으로 전달해 주는 모듈의 구성도이다.

[Table 2] Communication module specifications

Article	Specification
Address (ID)	1~31
Transmission rate (bps)	9600, 14400, 19200
Communication mode	RS232 / RS485
Voltage setting	0~Max Voltage
Current setting	0~Max Current
Output ON/OFF control	Possible



[Fig. 8] Communication Module Extend

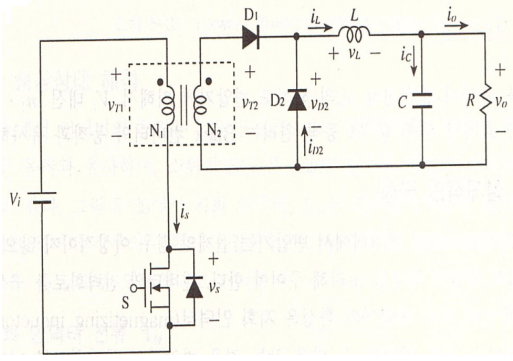


[Fig. 9] Power supply Rack block diagram

2.5 주 전력회로의 설계

2.5.1 주회로 설계

Fig. 10은 주회로 포워드 컨버터의 전력회로를 나타낸 것이다.



[Fig. 10] Forward converter circuit

목표 사양은 다음과 같다.

- 입력전압 $V_s = 311\,V$
- 출력전압 $V_o = 150\,V$
- 출력전류 $I_o = 10A$
- 스위칭 주파수 $F = 10kHz$F=10kHz
- 출력 전류 리플 : 정격의 10%, $\triangle I_o = 1A$
- 출력 전압 리플 : 정격의 10%, $\triangle V_o = 15\,V$

주어진 목표 사양을 만족하는 인덕터 L값과 캐패시터 C의 값인 식 (11)과 식 (12)는 정상상태에서 유도한 전류 리플 식과 전압 리플 식을 이용하여 구할 수 있다 [2-4].

듀티비 : $$DV_i \times \frac{N_2}{N_1} = V_o \quad (1)$$

$$D = \frac{V_o}{V_i} \times \frac{N_1}{N_2} = \frac{100}{311} \times \frac{1}{1} = 0.32 \quad (2)$$

$$D = 0.32$$

출력 저항 : $$R = \frac{V_o}{I_o} = \frac{150}{10} = 15\Omega \quad (3)$$

인덕터 전류 : $$I_L = I_o = \frac{V_o}{R} \quad (4)$$

$$I_L = 10A$$

변압기 권선비 : $$D_{\max} V_{i,\min} \frac{N_2}{N_1} = V_o + V_{on} \quad (5)$$

$$\frac{N_3}{N_1} = \frac{1}{D} - 1 \quad (6)$$

$$N_3 = (\frac{1}{D} - 1) \times N_1 = (\frac{1}{0.32} - 1) \times 1 \quad (7)$$

$$N_3 = 2.12$$

$$N_1 : N_2 : N_3 = 1 : 1 : 2.12$$

턴 수 : $$N_1 = \frac{V_{i,\min} \times D_{\max} \times T_s}{\triangle B \times A_e} \quad (8)$$

$$= \frac{280 \times 0.32}{140 \times 10^{-3} \times 148 \times 10^{-6} \times 10 \times 10^3} = 432[turn]$$

$$N_2 = \frac{V_o + V_F + rI_o}{D_{\max} \times V_{i,\min}} \times N_1 \quad (9)$$

$$= \frac{V_o N_1}{D_{\max} \times V_{i,\min}} = \frac{150 \times 432}{0.32 \times 280} = 723[turn]$$

$$N_3 \le \frac{1 - D_{\max}}{D_{\max}} \times N_1 \quad (10)$$

$$= \frac{1 - 0.32}{0.32} \times 432 = 918[turn]$$

인덕터의 인덕턴스 값 :

$$L = \frac{V_o \times (V_s - V_o)}{\triangle I_o \times F \times V_s} \quad (11)$$

$$= \frac{150 \times (311 - 150)}{1 \times 10 \times 10^3 \times 311} = 7.76mH$$

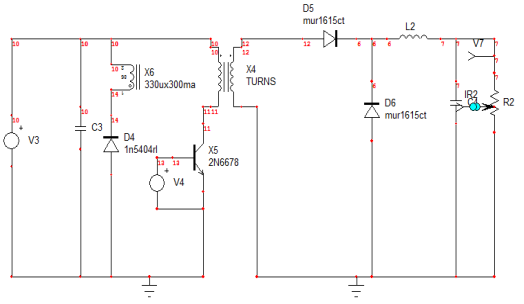
캐패시터의 캐패시턴스 값 :

$$C = \frac{1-D}{8L \times \left(\frac{\Delta V_o}{V_o}\right) \times F^2} \quad (12)$$

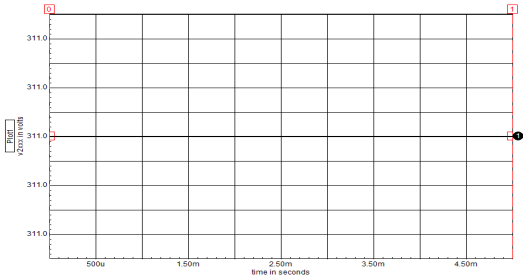
$$= \frac{1-0.32}{8 \times 7.76 \times 10^{-3} \times \left(\frac{15}{150}\right) \times (10 \times 10^3)^2} = 1.09uF$$

2.5.2 주회로 시뮬레이션

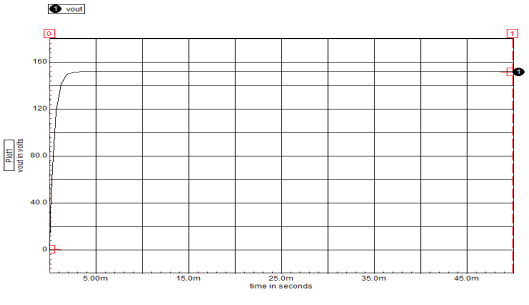
Fig. 11는 주회로에 사용된 포워드 컨버터의 회로도이다. 실제 구현되는 소자와 정격이 비슷한 소자들을 적용하여 시뮬레이션을 실행하였다. 주회로의 스위칭 소자의 게이트 신호는 IsSpice의 pulse generator 기능을 통해 인가하였다.



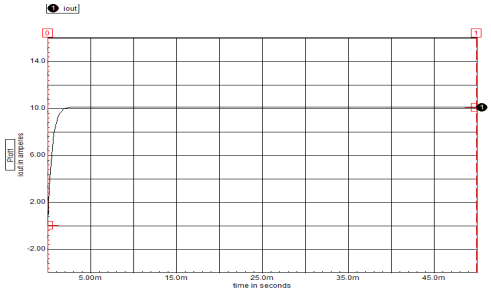
[Fig. 11] Simulation is used in the main circuit



[Fig. 12] Input voltage



[Fig. 13] Output voltage



[Fig. 14] Output current

Fig. 12, 13, 14는 각각 입력전압, 출력전압, 출력전류 파형이다. 목표 사양으로 제시된 정격의 10% 이내로 출력 전압과 전류의 리플이 유지됨을 확인 할 수 있다.

출력 전압, 전류 리플을 1% 이내로 줄이기 위한 인덕터와 캐패시터의 값은 다음 식 (13), (14)와 같이 계산된다[2-4].

인덕터의 인덕턴스 값 :

$$L = \frac{V_o \times (V_s - V_o)}{\Delta I_o \times F \times V_s} \quad (13)$$

$$= \frac{150 \times (311-150)}{01 \times 10 \times 10^3 \times 311} = 0.077H$$

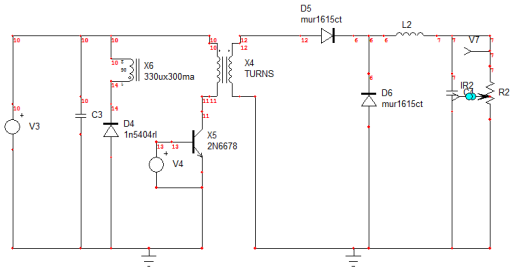
캐패시터의 캐패시턴스 값 :

$$C = \frac{1-D}{8L \times \left(\frac{\Delta V_o}{V_o}\right) \times F^2} \quad (14)$$

$$= \frac{1-0.32}{8 \times 0.077 \times 10^{-3} \times \left(\frac{1.5}{150}\right) \times (10 \times 10^3)^2} = 0.84uF$$

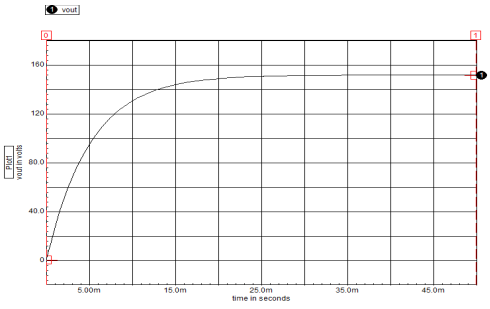
바뀐 사양에 따라서 검토한 각 회로 방식에 대한 회로 및 시뮬레이션 결과는 Fig. 15 ~ Fig. 26과 같다.

2.5.2.1 포워드 컨버터

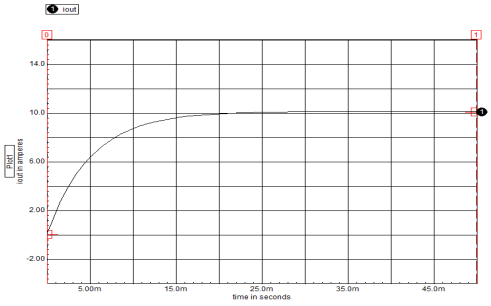


[Fig. 15] Forward converter circuit

Fig. 16과 Fig. 17은 식 (13), (14)로 계산된 파라미터 값을 가지고 구동한 포워드 컨버터의 출력 전압, 전류 파형이다.

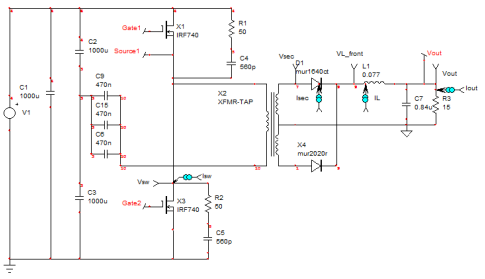


[Fig. 16] Output voltage(forward converter)



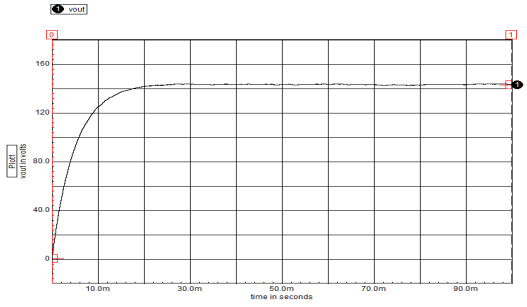
[Fig. 17] Output current(forward converter)

2.5.2.2 하프브리지 컨버터

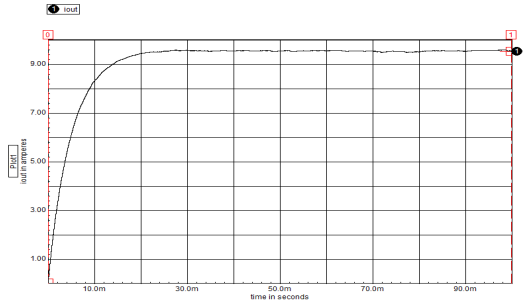


[Fig. 18] Half-bridge converter circuit

Fig. 19과 Fig. 20은 식 (13), (14)로 계산된 파라미터 값을 가지고 구동한 하프브리지 컨버터의 출력 전압, 전류 파형이다.

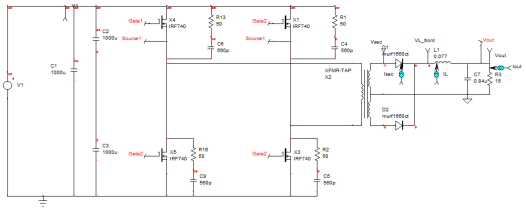


[Fig. 19] Output voltage(half-bridge converter)



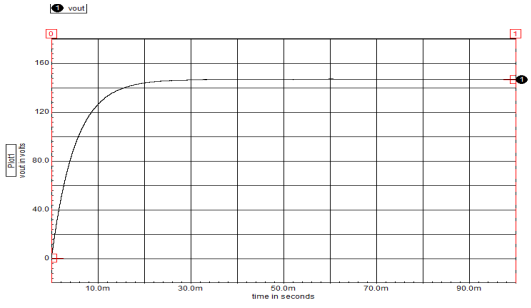
[Fig. 20] Output current(half-bridge converter)

2.5.2.3 풀브리지 컨버터

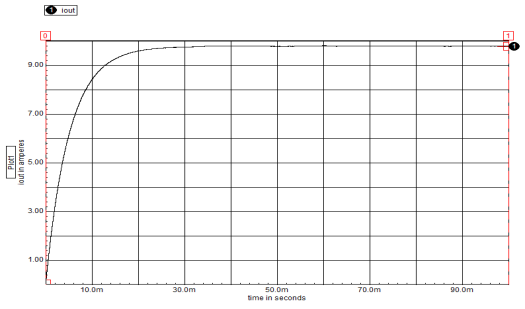


[Fig. 21] Full-bridge converter circuit

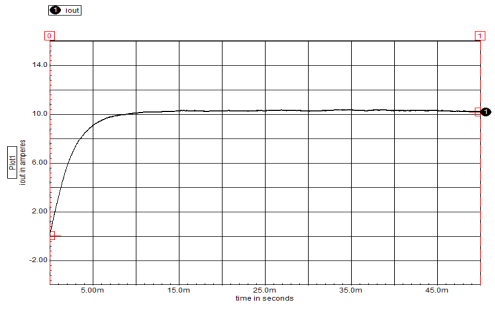
Fig. 22과 Fig. 23은 식 (13), (14)로 계산된 파라미터 값을 가지고 구동한 포워드 컨버터의 출력 전압, 전류 파형이다.



[Fig. 22] Output voltage(full-bridge converter)

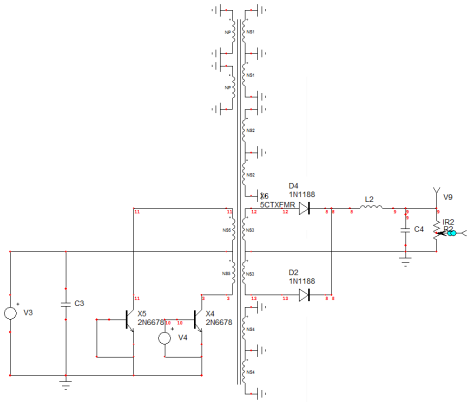


[Fig. 23] Output current(full-bridge converter)



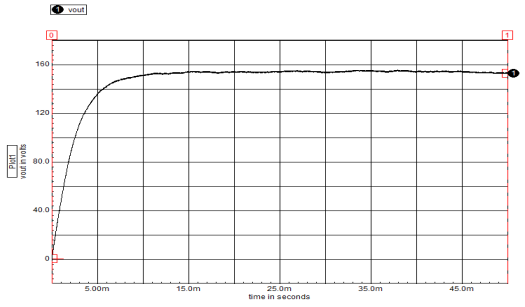
[Fig. 26] Output current(push-pull converter)

2.5.2.4 푸시풀 컨버터



[Fig. 24] Push-pull converter circuit

Fig. 25과 Fig. 26은 식 (13), (14)로 계산된 파라미터 값을 가지고 구동한 포워드 컨버터의 출력 전압, 전류 파형이다.



[Fig. 25] Output voltage(push-pull converter)

시뮬레이션을 통해 설계된 파라미터로 구동하였을 때 출력 전압리플, 출력 전류 리플 값이 허용치(1%) 이내임을 확인 할 수 있었다.

2.6 전원장치 실험

전원장치 개발 후 성능 시험을 한 결과보고서는 Table 3과 같다. 출력전압의 잡음치가 사양에 적합함을 확인할 수 있었다.

[Table 3] Test certificate(150V/10A)

Inspection items	Specification	Measured value	Judgment	Note
Maximum output voltage	DC 150V	150V	OK	-
Maximum output current	DC 10A	10A	OK	-

Input voltage	Input current	Input power	output voltage	output current	Ripple	Efficiency	Note
AC 220V	0.04A	65W	150.09V	-	-	-	NO LOAD
	7.02A	1.55KW	150.09V	9.137A	43mV	88.9%	LOAD

3. 결론

자동차용 반도체의 경우는 가정용, 산업용에 비해서 사용조건이 매우 엄격하며, 신뢰성 확보가 가장 중요하다. 신뢰성 시험은 저압 시험의 경우는 VLSI, 반도체 등 시험을 할 수 있는 장비가 개발되어 사용되고 있지만 고내압 소자의 경우는 신뢰성 시험을 하기 위한 장비가 국산화 되어 있지 않다.

본 논문에서는 신뢰성 시험을 위한 전원장치의 사양을 결정하기 위하여 관련 시험규격을 분석하였고, 특히 자동차용 반도체 신뢰성 시험을 위한 AEC Q101에서 시험항목을 분석하여 개발에 필요한 전원장치의 사양을 결정하였다. 전압 공급값은 FET의 드레인-소스 시험을 위한 1KV, 게이트-소스 시험을 위한 150V로 각각 결정하였다.

또한 관련된 리플값(1%)과 보호 항목(과전압, 과전류, 온도)을 결정하였다. 장치는 랙타입으로 구성하였으며, 주회로 설계를 위하여 포워드, 하프브리지, 풀브리지, 푸시풀 컨버터를 주어진 장치 사양에 따라 각종 변수를 설계하였으며 이를 IsSpice를 통한 시뮬레이션을 수행하여 회로 변수의 적절성을 검증하였다. 개발된 전원장치의 사양은 1KV/10A, 150V/10A로서 시험을 통하여 최대 출력전압, 최대 출력전류, 출력전압의 리플, 효율을 측정하였다. 장치의 구성은 드레인-소스 시험과 게이트-소스 시험을 동시에 수행할 수 있는 1KV/10A, 150V/10A 두 개의 전원으로 구성된 랙과 게이트-소스 시험만 가능한 150V/10A 랙으로 구성되어 있다.

References

[1] AEC Q101, "Stress Test Qualification for Automotive Grade Discrete Semiconductors", 2005

[2] Christophe P. Basso, "Switch-mode power supplies", p.30-66, HONGRUNG publishing company, 2011

[3] Eui-Cheol Nho, et. all, "Power Electronics", p.188-386, MUNUNDANG, 2006

[4] Daniel W. Hart, "power electronics utilizing PSpice", INTERVISION, 2000

박 대 수(Dae-Su Park) **[정회원]**

- 2006년 2월 : 건양대학교 디지털정보제어공학 (공학사)
- 2013년 2월 : 한국기술교육대학교 대학원 전기공학과 (공학석사)
- 2013년 3월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 대학원 전기공학과 (공학박사)

<관심분야>
전원장치 설계, 신재생에너지

오 성 철(Sung-Chul Oh) **[정회원]**

- 1980년 2월 : 서울대학교 전기공학과 (공학사)
- 1982년 2월 : 서울대학교 대학원 전기공학과 (공학석사)
- 1989년 5월 : Univ. of Florida 전기공학과 (공학박사)
- 1982년 3월 ~ 1994년 8월 : 한국전기연구원 선임연구원
- 1994년 9월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 전기전자통신 공학부 교수

<관심분야>
전력변환장치 설계, 전원장치 설계, 전동기제어