

1200V 50A급 컨버터 인버터 일체형 12-스위치 저 손실 지능형 전력모듈

이민섭*, 송준호*, 이준배*, 정대웅*, 이남원**

LS power semitech 연구개발 센터*

다윈전자 연구개발 센터**

1200V 50A All-in-one Converter and Inverter 12-Switch Low Loss Intelligent Power Module

Min-Sub Lee*, Jun-Ho Song*, Jun-Bae Lee*, Dae-Woong Chung*

Nam-Won Lee**

LS power semitech R&D center*

Dawin electronics, R&D center**

ABSTRACT

본 논문에서는 1200V, 50A급의 컨버터 인버터 일체형 12-스위치 저 손실 지능형 전력모듈을 소개한다. 게이트 구동회로, 보호회로, IGBT 모듈을 통합한 이 전력모듈은 최적의 게이트 구동회로, 시스템 고밀도화 그리고 인피니언의 트랜치 필드스톱2 IGBT와 FRD를 사용한 높은 효율의 컨버터와 인버터 일체형으로 구현하였다. 본 논문을 통해 높은 파워가 요구되는 가전기기, 산업용 인버터의 애플리케이션에 적합하게 설계된 전력모듈에 대한 소개와 함께 그 특징 및 시스템 구성을 위한 고려사항에 대하여 기술하였다.

1. 서론

최근의 기술 방향은 에너지 절약과 높은 성능에 대한 요구가 크게 증가하고 있는 시대이다. 이러한 요구에 부응하기 위해 높은 파워를 고효율, 소형화 및 신뢰성을 동반하며 구현하는 것이 경쟁력이 되어가고 있다. 산업용 인버터, 시스템 에어컨 등의 높은 파워와 신뢰성이 요구되는 시장에 맞추어 본 모듈이 개발되었다. 고밀도성 소형화를 위하여 IGBT를 이용한 컨버터와 인버터를 단일 모듈로 구현하였으며 전력용 소자, 드라이브 회로 및 보호회로는 적층형 구조를 이루고 있다.



그림 1. 12-스위치 지능형 전력모듈

고효율을 위하여 전력용 소자로는 인피니언의 트랜치 필드스톱2 IGBT와 FRD를 사용하였고 인피니언의 코어리스 트랜스포머 방식의 2-채널 게이트 구동 IC를 사용하여 기존의 HVIC와 비교하여 높은 안정성을 제공한다. 부스트스트랩 방식의

회로를 적용하여 단일전원으로 컨버터와 인버터의 12개 스위치를 모두 구동할 수 있는 비용절감 효과가 있으며 카파 플레이트를 사용한 방열 성능, 내열성 및 높은 기계적 강도와 뛰어난 전기절연성을 제공하는 패키지의 사용을 통해 보다 높은 성능 및 효율을 제공한다. 이에 따라 사용자는 제품개발시간의 단축과 동시에 고신뢰성 및 고효율의 제품을 구현할 수 있다.^[3]

2. 모듈의 소개

2.1 컨버터와 인버터의 일체형 구조

본 전력 모듈에는 IGBT, FRD로 구성된 삼상 풀브릿지의 컨버터와 인버터가 일체형으로 구현되어 있다. IGBT 컨버터는 삼상 정류다이오드 대비 높은 효율과 안정적인 직류전압을 구현할 수 있다. 정류다이오드의 사용 시 3상 전원의 이상을 감지하지 못하고 인버터의 전원단에 그대로 전달하게 되는데 이를 대비하기 위하여 외부에 LC필터를 장착하여야 하지만 IGBT 컨버터의 경우 이상 전원이 발생하여도 전류를 제어하기 때문에 높은 안정성을 구현할 수 있다. 모듈 외부에 장착되는 인버터의 직류 전원단을 구성하는 필터의 제거와 전해콘덴서의 크기나 용량의 소형화를 통해 비용절감 및 시스템 소형화를 제공할 수 있다.

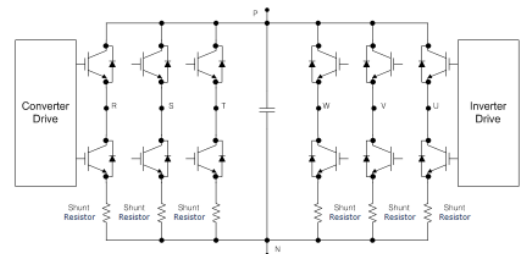


그림 2. 컨버터와 인버터의 구조도

컨버터에서 인버터로 연결되는 길이가 길어짐에 따라 인덕턴스 성분이 증가되고 이때 발생하는 인덕턴스 성분에 의하여 전류의 변화가 생기는 스위칭 구간에서 인버터단의 파워소자에 과도전압이 인가될 수 있다. 그러나 본 제품은 모듈 내부를 통해 컨버터와 인버터간의 거리가 최적화 되어 있어 인덕턴스성분의 최소화를 구현함으로써 동작 중 발생하는 과도전압을 개선할 수 있다.

2.2 파워소자

소개된 12-스위칭 전력모듈에서는 스위칭 소자로 최첨단 설계기술로 만들어진 인피니언의 트렌치 필드스톱2 IGBT를 탑재하여 제작된 IGBT 모듈을 사용하였다. IGBT 설계의 최첨단 기술인 트렌치 필드스톱2 IGBT는 작은 도통손실과 턴 오프 손실을 제공한다. 그림 2에서와 같이 IGBT의 설계 기술은 얇은 칩 두께, 높은 내압, 작은 도통 전압, 작은 턴 오프 손실을 목표로 기술이 발전되어오고 있다.

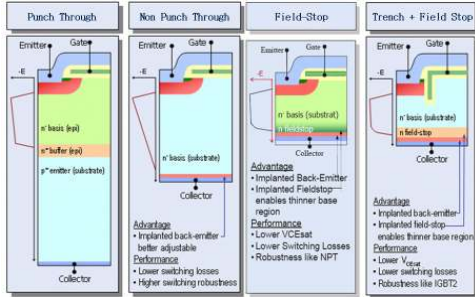


그림 2. IGBT 세대에 따른 설계 기술의 발전

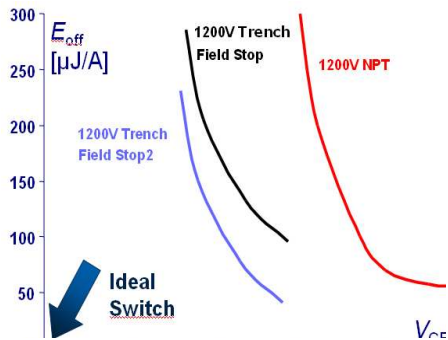


그림 3. 각 IGBT 기술에 따른 턴 오프 손실과 도통 전압의 트레이드 오프 곡선

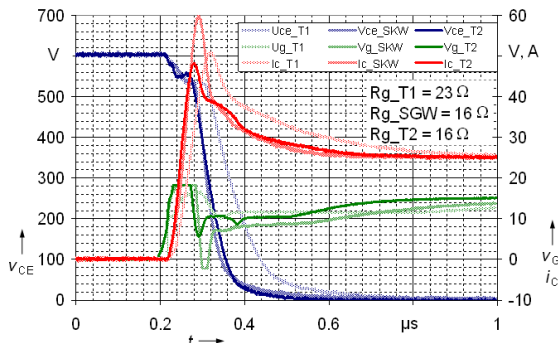


그림 4. 각 IGBT 기술에 따른 턴 온 특성 비교 (T1 = TrenchStop1, SKW=Fast NPT, T2=TrenchStop2)

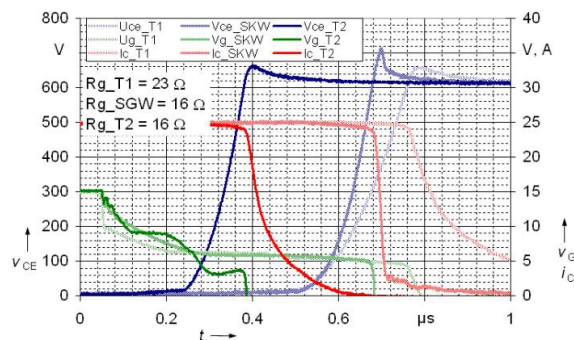


그림 5. 각 IGBT 기술에 따른 턴 오프 특성 비교 (T1 = TrenchStop1, SKW=Fast NPT, T2=TrenchStop2)

그림 3에서와 같이 턴 오프 손실과 도통전압 간에는 트레이드 오프가 존재하는데 각 애플리케이션에서의 필요 동작 특성에 따라 가장 좋은 효율을 낼 수 있는 IGBT를 선정해야 한다. 예를 들어 고속 스위칭을 하는 시스템에서는 턴 오프 손실 (E_{off})이 작은 IGBT를, 저속 스위칭을 하는 시스템에서는 온드롭 전압(V_{CE(sat)})이 낮은 IGBT를 선택하여 높은 효율을 구현해야 한다. 그림5에서와 같이 설계된 전력모듈에 사용된 트렌치 필드스톱2 IGBT는 턴 오프 시 초기 전류의 di/dt 저감으로 인한 스파이크 전압의 최소화 및 꼬리전류의 최소화를 제공한다.^[1] 또한 IGBT와 병렬로 사용되는 인피니언의 FRD는 빠르고 소프트한 역회복 특성을 제공하여 작은 스위칭 손실과 최적화된 EMI특성을 제공한다.^[3]

2.3 제어보드

2.3.1 게이트 구동 IC

상단의 IGBT를 구동하기 위해서는 절연된 게이트 구동단이 필요하다. 본 전력모듈에서는 코어리스 트랜스포머 방식으로 설계된 1200V급의 게이트 드라이브 IC를 사용함으로써 오픈 커플러 방식과 비교하여 짧은 전파지연 시간을 얻을 수 있고, HVIC 방식과 비교하여 높은 안정성을 제공할 수 있다. HVIC 방식의 경우 상단 IGBT의 턴 오프 시 상단 IGBT의 에미터 측, 드라이브 IC의 2차측 그라운드가 1차측 그라운드보다 순간적으로 낮아지게 되는데 이때에는 상단 IGBT에 대한 입력단의 신호가 전달되지 않을 수 있다. 코어리스 트랜스포머 방식의 게이트 드라이브 IC를 사용함으로써 이러한 문제점은 해결될 수 있다.^[2]

2.3.2 버퍼회로 및 보호회로

제어보드에는 스위칭, 도통 손실을 최소화하기 위해 그림 6과 같이 버퍼회로가 추가 되었으며, 게이트 드라이버의 보호기능으로 과전류, 단락전류, 과온도, 저전압의 4가지에 대한 보호기능이 들어 있다. 그림 8에서 보는 바와 같이 각 인버터 레그의 하단 IGBT의 에미터에 직렬로 연결된 선티저항을 흐르는 상전류를 전압으로 검출하여 각 상에서 발생하는 과전류와 단락전류의 검출 및 보호가 가능하도록 보호회로가 설계되었다. 상전류 검출 시 노이즈 제거를 위해 선티전압 검출단에 2단계의 필터가 삽입되었고, 검출된 전압은 증폭기를 통해 전압이 증폭되도록 되어있다. 사용된 증폭기에 부의 전압이 인가되면 오동작의 우려가 있으므로, 증폭기 부의 입력 단에 풀업 저항을 삽입하여 노이즈 면적이 증가되도록 되어 있으며, 증폭기의 출력 단에는 각 상의 검출 전압을 독립적으로 검출 가능하도록 3개의 다이오드를 사용하여 3개의 검출 전압 중 가장 큰 전압만 검출 가능하도록 되어 있다. 그림 9는 적용된 보호회로를 통한 과전류 및 단락전류의 보호동작을 보여주고 있다. IGBT를 구동하기 위한 바이어스 전압인 VSL 전압이 IC 내부 설정된 11V 이하로 내려가게 되면, 12개의 IGBT 모두 오프가 되며, 상단 IGBT를 구동하기 위한 바이어스 전압인 VSH 전압이 설정 전압인 11V 이하로 떨어지면, 상단의 IGBT만 오프 되도록 구성되어 있다. 저전압 보호 기능은 게이트 드라이버의 중요한 기능이다. IGBT의 게이트 전압이 낮아지게 되면, IGBT의 도통 및 스위칭 손실의 증가로 인해 인버터 효율 감소 및 내부 IGBT 온도가 상승하여 파손의 우려가 있다. DBC 기관

위에 NTC가 삽입되어 있고, 그림 10과 같이 회로가 구성되어 온도를 보호한다. 그림 11은 그림 10에서 구성된 회로에서 비교기의 양의 입력단자 전압(V_{temp})과 NTC 온도간의 상호 관계 곡선을 나타낸다. 그림 11을 통해 NTC 온도가 125도일 때, 보호회로가 동작하도록 설계되었음을 확인할 수 있고, 그림 12에서는 NTC 온도에 따른 보호회로의 동작을 보여주고 있다.^[3]

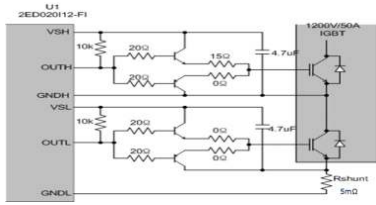


그림 6. 게이트 드라이버 출력단 회로도



그림 7. 정현파 부하전류 구동 시 부하전류의 센싱

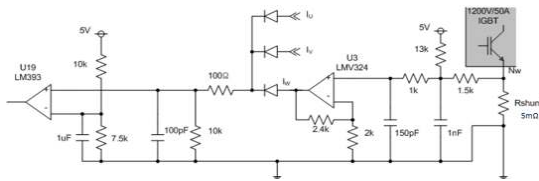


그림 8. 과전류 및 단락전류 보호회로

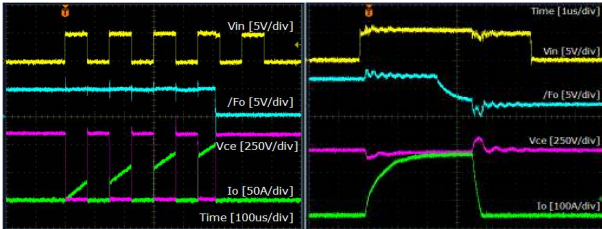


그림 9. 과전류 보호동작(좌) 및 단락전류 보호 동작(우)

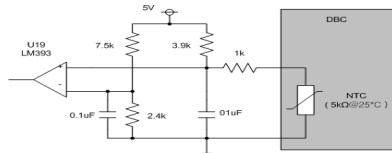


그림 10. 과 온도 보호회로

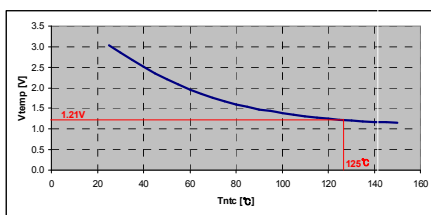


그림 11. 검출 전압과 NTC 온도와의 관계 곡선

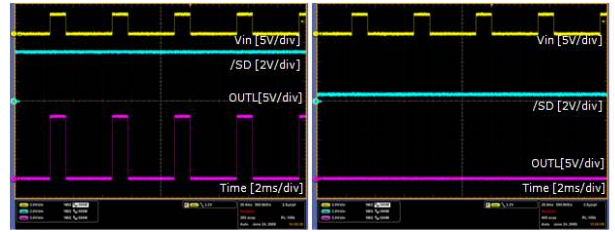


그림 12. 125도 미만(좌), 125도 보호회로 동작 파형(우)

2.4 패키지

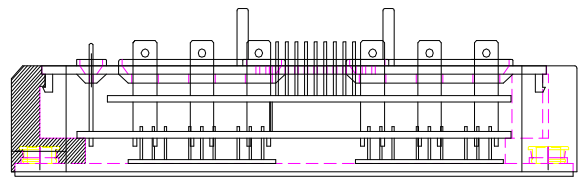


그림 11. 지능형 전력모듈의 구조도

2.4.1 구조

그림 11은 본 지능형 전력모듈의 구조도이다. 지능형 전력모듈 패키지의 디자인 시 주안점은 높은 신뢰성 확보와 효율을 극대화 시키는 것에 있다. 패키지의 크기가 커짐에 따라, 첫째로 베이스의 힘에 대한 부담, 둘째로 전체적 시스템의 면적 제한, 셋째로 원자재의 가격적 상승 등의 문제가 수반된다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서 적층 구조를 이용하였다. 전력 보드와 제어 보드를 분리하여 적층으로 구성하고 절연을 확보하기 위해서 실리콘 겔을 주입하였다.

2.4.2 보이드

보이드(Void)란 솔더링 시 칩(소자)과 DCB간 기포가 빠져나가지 못한 상태에서 솔더링이 완료되어 속이 비어있는 상태를 말한다. 보이드가 있는 상태에서 스위칭 소자의 운전 시 IGBT 내부의 해당 셀(Cell)에 열이 집중되면서 $T_j(max)$ 를 초과하게 되어 열 폭주에 의한 파손이 발생한다. 이에 최소한의 보이드를 확보하기 위해 칩과 DCB간 접착을 진공로를 이용한 공정으로 보이드를 최소화 하였다. 본 과제에서는 이를 해결하기 위하여 칩과 베이스간의 접착 공정을 진공로를 사용하도록 설계하였다. 그림 12는 진공로를 이용하여 작업 한 모듈의 X-RAY 사진이다.

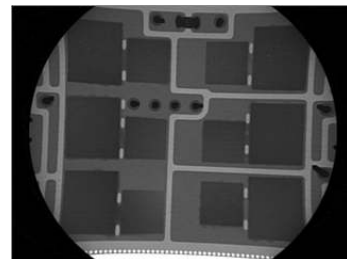


그림 12. 전력모듈의 X-RAY

2.4.3 DCB

PCB기판의 종류는 다양하다. FR4, AL₂O₃, ALN, 메탈 기판 등 다양한 종류의 기판들이 그 응용 범위에 따라 활용되어 지고 있다. 그 중 반도체 모듈에서 사용하는 기판은 발열 특성이 우수하고 작업성이 우수해야 하는 점 때문에 메탈 기판, ALN, AL₂O₃ 등이 많이 사용되고 있다. 본 과제에서는 가격적인 면과 특성적인 면을 고려하여 반도체 모듈 PCB는 AL₂O₃(96%)를 사용하고, 제어보드와 파워보드는 FR4를 사용하였다.

컨버터부와 인버터부를 통합한 12SW를 하나의 모듈에 설계하는 방법과 6스위치를 컨버터부와 인버터부로 따로 분리하는 방법에 대해 연구를 진행하였고 그림 13의 시험 결과에 따라 두개의 모듈을 사용하는 것으로 결정하였다. 통합 DCB를 사용하였을 경우 상기 그림과 같이 'W'형자를 확인 할 수 있었다.

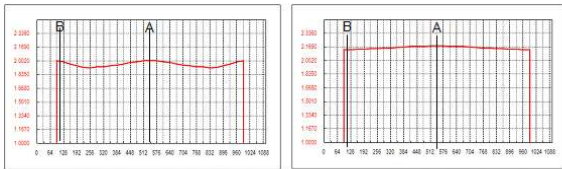


그림.13 종류별 베이스 휨 측정값

2.4.4 베이스(Warpage 연구)

베이스의 역할은 주 스위칭 소자인 IGBT의 열 폭주 방지, 발생한 열을 외부로 방출하여 스위칭 소자의 신뢰성을 확보하는 역할을 담당한다. 따라서 베이스의 휨의 정도에 따라 패키지의 신뢰성에 중요한 영향을 초래할 수 있다. 본 연구 과제에서는 12개의 스위치를 하나의 패키지에 구성해야 하기 때문에 베이스의 크기를 가로(147) * 세로(70) * 높이(3)mm로 선정했다. 베이스의 크기가 상당히 커지면서 Warpage를 Typ. 100um로 설정하기 위해서 연구했다. 연구 내용으로 납 성분에 따른 연구와 초기 휨 값에 따른 연구를 진행하였다. Pb 계열의 납을 사용하여 베이스와 DCB간의 접착 시 베이스의 휨은 초기 휨 값을 따라가는 특성을 보였지만, Pb 프리 솔더를 사용하였을 경우에는 초기의 휨 값을 따라 가지 않고 마이너스의 휨을 보였다. 상기의 문제는 Pb 계열보다 Pb프리 계열의 솔더가 인장력이 더 크기 때문인 것으로 확인되었다. 본 전력모듈에 사용된 솔더는 Sn/Ag/Cu 이다. 부분에서 초기 베이스의 휨 값에 따른 완제품의 휨 정도는 앞에서 언급한 내용과 같이 6스위치 모듈을 분리하여 사용하고 초기 휨 값을 200um로 선정하여 진행시 원하는 완제품의 휨 값을 얻을 수 있었다. 또한, 열전달 능력이 뛰어난 카파(Copper) 플레이트를 적용했다. 그림 13은 Warpage란 어떠한 것인지를 보여준다. 그림 15는 일자별 Warpage 변화량에 대한 연구내용을 보여준다.

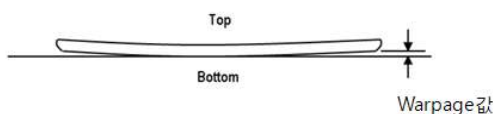


그림 14. Warpage 측정 방향

공정 No	Income	Module Assy					B/M Assy						
		Die Attach	Soldering	Wirebonding	M Attach	Soldering	Case Attach	Gate b/d Attach	Gel	출입물	1주	2주	3주
1	200um	-70	-80	-55	-80	-50	-30	-30	90	90	105	110	110
2									9	10	11	12	13

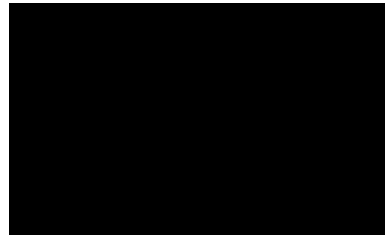


그림 15. 일자별 변화량(측정 데이터 및 그래프)

2.4.5 공 정(Process)

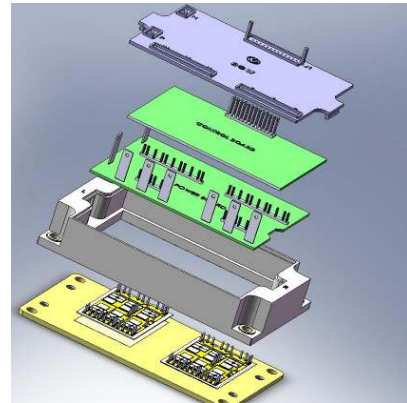


그림 16. 지능형 전력모듈의 분해도(3D)

그림 16은 지능형 전력모듈의 조립순서에 따른 분해도를 보여주고 있다. 전력 모듈의 제작 순서는 스크린 프린터를 이용하여 DCB(AL₂O₃)에 Pb free 솔더를 약 150um 두께로 도포한 후 IGBT 및 FRD를 탑재한다. 베이스와 DCB는 Preform 0.2mm를 사용하여 접착시킨다. 전력모듈의 터미널들을 지그를 이용 정 위치에 놓는다. 완료된 형태를 진공로의 플레이트에 지그를 이용하여 탑재 한 후 미리 검토한 온도 및 진공조건으로 작업한다. 위에 나온 제품을 X-RAY를 통하여 보이드 상태를 검사한 후 양품인 제품과 불량인 제품을 선별한다. 납에는 플럭스가 함유된 것을 사용하기 때문에 반드시 세척(Cleaning) 공정을 거쳐야 한다. 그렇지 않을 경우 와이어 본딩 공정에서 에러가 발생하기 때문이다. 다음 공정으로 알루미늄 와이어 본딩 공정을 통해 IGBT 및 FRD의 파워선 및 신호선을 초음파로 접착한다. 케이스 아래 부위에 실리콘 러버(TSE-322)를 골고루 도포한 후 OVEN에 150℃에서 1시간 동안 유지하여 완전히 경화시킨다. 목적은 차후 절연을 확보하기 위해 사용하는 '실리콘 겔' 주입 시 외부로 누수를 방지하기 위해서다. 실리콘의 경화공정을 거친 제품에 제어보드 및 전력보드를 케이스와 함께 조립한다. 조립된 제품을 실리콘 겔(TSE-3051C)로 완전 도포한다. 참고로 사용되는 실리콘 겔의 절연성은 18KV/mm의 특성을 가지고 있다.^[4] 상기와 같이 잠금(lock) 기능을 가지고 있는 커버를 본체와 조립함으로써 패키지가 완성된다.

3. 결 론

본 논문은 컨버터와 인버터의 통합, 지능형 전력 모듈을 제시하였다. 높은 신뢰성과 고효율, 고밀도성 소형화를 제공하는 지능형 전력 모듈의 개발을 통한 경쟁력 확보를 목적으로 본 제품이 개발 되었다. 최첨단 기술로 설계된 스위칭 소자, 최적화된 게이트 구동회로 및 보호회로를 통해 높은 신뢰성 및 고효율을 구현함과 동시에 빠른 제품 개발시간을 제공하게 된다. 적층형 구조의 패키지를 통한 설계 방법에 의해 본 전력모듈을 통해 계속되는 고밀도성 소형화의 요구에 보다 빠르게 대응할 수 있을 것으로 기대한다.

본 논문은 에너지 관리 공단의 연구비를 지원받아 수행한 연구 결과입니다.

참 고 문 헌

- [1] M. Bäbler, et al.: "1200V IGBT4 High Power a new Technology Generation with Optimized Characteristics for High current Modules" Proceedings of the PCIM Nuremberg 2006.
- [2] M. Münzer, et al.: "Coreless Transformer a new Technology for Half Bridge Driver IC's" Proceedings of the PCIM Nuremberg 2003.
- [3] JunHo Song, et al.: "1200V 50A급 6-스위칭 저 손실 지능형 전력모듈" 2009 전력전자학술대회.
- [4] TSE-3051C Datasheet - GE Toshiba