전동기 구동용 IGBT 소자의 열화 진단
Deterioration Test of IGBT Devices in Motor Driver

안종곤* 박순명 김태기 강주희
Jong, Kon-Ahn Soon, myung-Park Tae, gi-Kim Ju, hee-Kang

ABSTRACT

Motor is energy converting system to generate mechanical force from electrical power and there are various typed motors in home, office, factory, vehicles, aircraft, shipping, etc. Recently in compliance with performance and reliability and the applications of variable speed motors with invert driver are expanded. Almost high power inverter have IGBT and IGBT's fault cause motor system fault. If we can calculate and foresee troubles of IGBT, we can protect accident caused by motor system fault.

In this paper, the deterioration test method of IGBT devices is proposed and the test results of proposed method are shown by evaluated equipment. The basic concept of proposed method is current-voltage characteristic curve test between drain and source of IGBT in open state. The applied voltage type is ramp and it is confirmed that the current-voltage curvet pattern of IGBT in open state represents IGBT's deterioration state.

1. 서론

전동기는 전기에너지를 기계에너지로 변환하는 장치로 주택을 비롯하여 사무실, 공장, 차량, 항공기, 선박 등 모든 곳에 존재한다. 전동기는 동작 원리, 제어 구조, 용도, 형상에 따라 다양한 종류가 있는데, 근래에 들어 인버터를 채용한 전동기가 많이 활용되고 있다. 철도차량 구동 등 대전력 전동기 제어를 위한 인버터에는 IGBT라는 소자가 채용되는 경우가 대부분인데, IGBT 소자에 문제가 있으며 전동기 구동 불능 상황이 빚어진다. 만약 IGBT의 문제 발생 가능성을 미리 예지할 수 있다면 전동기 구동 불능 상황에 의한 사고를 예방할 수 있다.

IGBT와 같은 전력용 반도체 소자는 일반적으로 수명이 반영구적이라고 알려져 왔는데, 실제 산업현장에서 사용되고 있는 IGBT 소자들의 경우 사용 시간이 경과하면 전기적 특성 변화가 관측됨으로써 소자의 교체를 필요로 하게 된다. 소자의 교체 없이 사용이 지속되면 갑작스런 소자 파손이 발생될 수 있다. IGBT가 사용되는 철도 차량의 경우, IGBT 소자의 파손은 차량의 운행 정지로 연결되며, 이는 물적 손실과 더불어 철도 운용사의 불신으로 까지 연결되는 문제이다.

IGBT 소자의 열화는 소자내의 접합면 취약부위로 전기적 물리적 스트레스가 집중되어 취약부위가 증폭, 확산됨으로써 발생된다. 취약부위는 제조 공정에서의 결함이나 가공 불량으로 인해 존재하게 되는데 아주 양호한 제품의 경우에도 소자 접합면의 불균질성으로 인하여 소자 내에 미세 취약부가 반드시 존재하게 된다.

본 논문에서는 전동기 구동용 인버터에 사용되는 대전력 IGBT 소자의 열화 진단 방법을 제안하고, 제안된 진단 방법의 타당성을 보여준다. 제안된 IGBT 소자의 열화 진단 방법은 개방 상태 IGBT의 드레인(drain) 단자와 소스(source) 단자 사이에 램프 전압을 인가하고 이에 대한 누설전류를 측정하여 전압-전류 특성 곡선을 확보하여 평가하는 방법을 기본으로 한다. 제안된 방법은 IGBT 진단 장치로 구현되었으며 실제 IGBT 소자를 대상으로 테스트를 수행한 결과 제안된 방법이 IGBT 열화 진단에 적절함을 확인하였다.

2. 본론

2.1 IGBT 고찰

산업 현장에 사용되는 전력변환장치는 매우 다양하다. 용도에 따라 무정전 전원 장치, 전동기 구동장치, 고주파 전원 장치, 고전압 생성 장치 등으로 많은 분류할 수 있는데, 내부 구조에 따라 분류하면, AC-AC 변환기, AC-DC 변환기, DC-DC 변환기, DC-AC 변환기 등 4개로 분류된다. 이러한 전력변환기는 다양한 전력소자로 제작 가능한데, 각 전력소자는 동작 특성, 가능 용량 및 동작 주파수 특성을 달리하고 있으며, 이를 분류하면 도표 1과 같이 정리되고, 각 전력소자의 특성은 그림 1과 같이 정리된다.

도표 1. 전력 소자별 전력변환기 구성

구 분	AC-AC	AC-DC	DC-DC	DC-AC
Thyristor	Cyclo Converter VVCF Converter	Phase Cntl Conv.	DC chopper	Thy' Inverter
Power BJT	Matrix Converter	PWM Converter	Step-Down Conv. Step-Up Conv.	PWM Inverter
MOSFET	Matrix Converter	PWM Converter	Step-Down Conv. Step-Up Conv.	PWM Inverter
IGBT	Matrix Converter	PWM Converter	Step-Down Conv. Step-Up Conv.	PWM Inverter Multi-level Inv.
GTO Thy'	Matrix Converter			PWM Inverter Multi-level Inv.

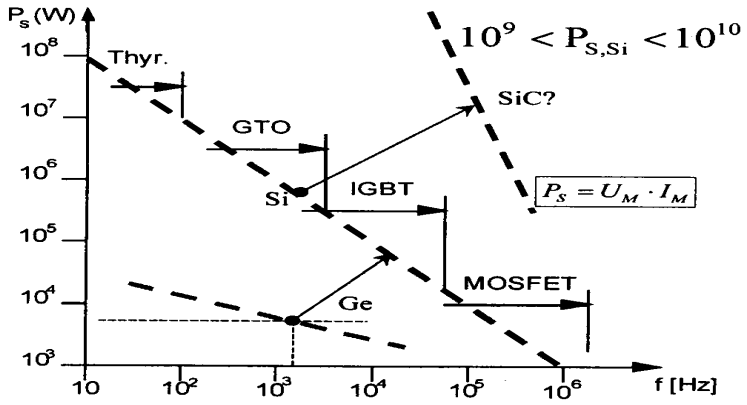
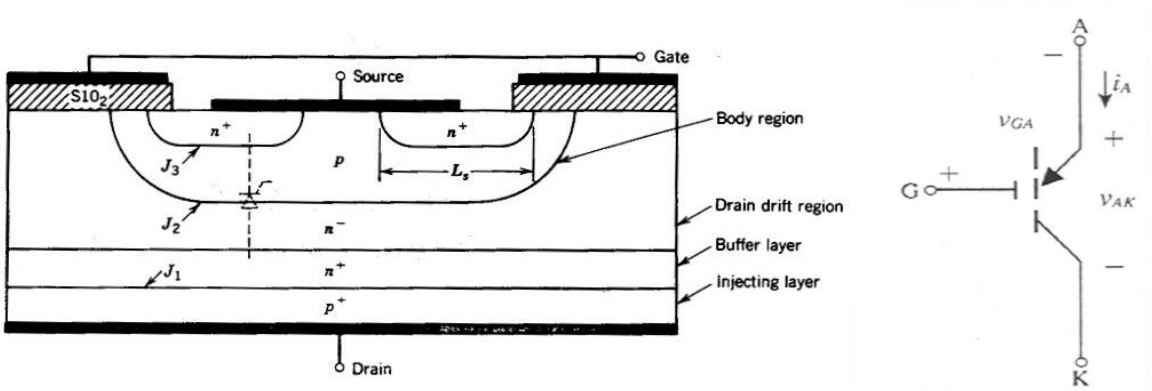


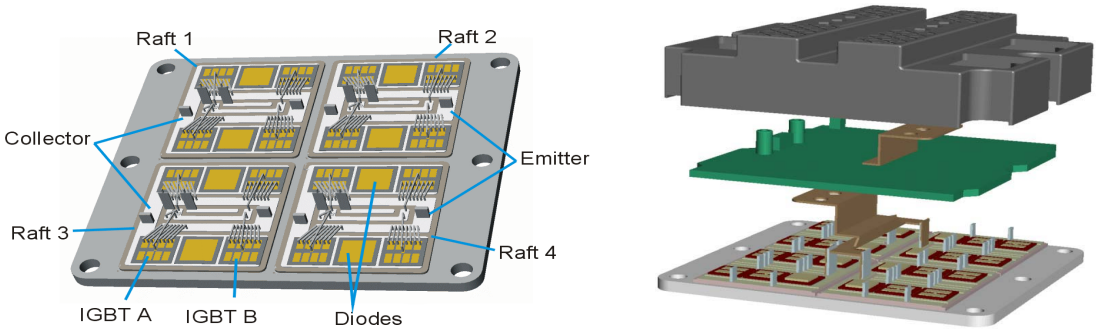
그림 1. 전력소자별 사용 용량 및 주파수 비교

IGBT(insulated gate bipolar-junction transistor)는 단독으로 500kW 용량까지 가능하며 동작 주파수가 70kHz까지 가능한 것으로 평가되고 있다. 일반적으로 동작 주파수가 높은 소자는 사용 용량이 낮고, 소자 용량이 높을수록 동작 주파수가 낮아지는데, IGBT는 산업계에 사용하기 좋은 사용 용량 및 동작 주파수 조건을 갖춘 전력소자인데, 절연 게이트 전압 구동 특성과 손실이 낮은 특성 등의 우수한 특성을 동시에 가지고 있다. IGBT의 내부 구조는 그림 2(a)와 같고, 회로 기호는 그림 2(b)와 같다. 그림에서와 같이 IGBT는 기본 구조가 BJT(bipolar junction transistor)여서 빠른 스위칭 특성을 가지며, gate가 FET와 같은 절연 특성을 가져서 BJT가 전류 구동 특성을 가지는 반면 IGBT는 전압 구동 특성을 가지면서 구동 전류가 아주 낮다. 그리고 SCR,과는 달리 gate에 전압이 인가되는 동안만 전류가 도통되고 gate 전압이 소거되면 즉시 OFF되는 특성을 가진다. 인버터는 IGBT를 4개 또는 6개를 사용하는 경우가 대부분인데, 사용으로 제작되는 IGBT는 여러 개의 IGBT가 조합된 모듈 형태가 대부분이며, 그림 3은 실제 많이 사용되는 IGBT 모듈의 웨이퍼 구조 및 조립 구조를 보여준다. 그림 4는 IGBT의 등가회로 및 동작 특성을 보여준다. 등가회로를 보면 gate가 MOSFET 구조를 가지고 주 전류 도통로는 PNP-type BJT와 NPN-type BJT가 조합된 형태를 가지는 것을 확인할 수 있다.



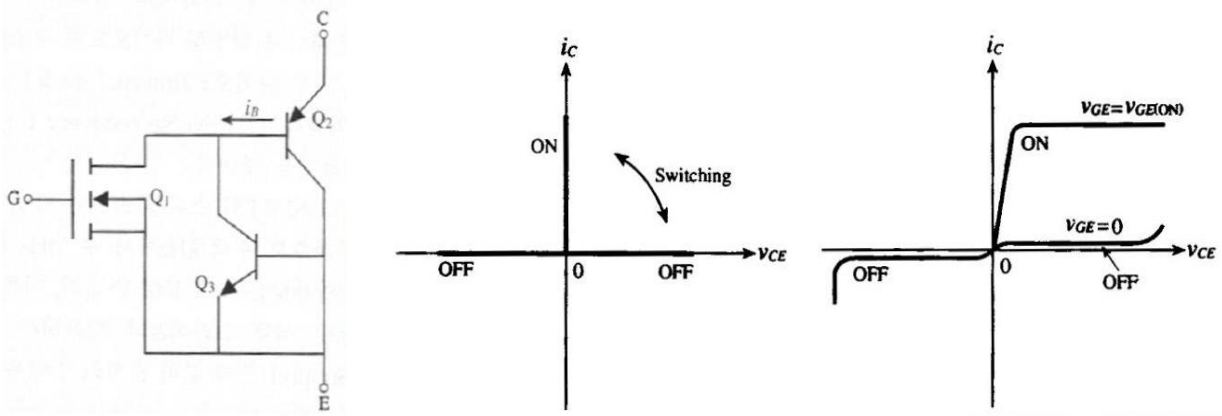
(a) IGBT의 생성 구조 (b) IGBT의 회로 기호

그림 2. IGBT 소자의 생성 구조 및 기호



(a)IBGT의 웨이퍼 생성 구조 (b) IGBT 모듈의 조립 구조

그림 3. IGBT 모듈의 조립



(a)IGBT의 등가회로 (b)IGBT의 이상적 동작 특성 (c)IGBT의 실제 동작 특성

그림 4. IGBT의 등가회로 및 동작 특성

그림 4(b)는 IGBT의 이상적 동작 특성을 보여주는데, gate에 전압이 인가되지 않는 OFF상태에서는 콜렉터-이미터 전압 V_{CE} 전압이 높아지더라도 콜렉터 전류 i_C는 0을 유지하고, gate에 전압이 인가되는 ON 상태에서는 V_{CE} 전압이 0으로 강하되어 유지되고, 콜렉터 전류 i_C는 무한대로 흐를 수 있다. 하지만 실계 IGBT는 그림 4(c)와 같이 사용 콜렉터-이미터 전압 V_{CE} 전압이 제한되고, 콜렉터 전류 i_C도 제한된 값을 가진다. 사용 콜렉터-이미터 전압 V_{CE} 전압의 제한은 콜렉터와 이미터 간의 절연 내압을 의미하며, 콜렉터 전류 i_C의 제한은 내부 임피던스로 인한 콜렉터-이미터 전압 V_{CE} 전압 상승으로 발생되는 손실에 기인한 발열 문제로 존재하는 문재이다. 실제 IGBT를 사용하는 전력변환기는 방열 기구를 구비하고 있는데 구동 용량이 클수록 큰 방열 용량을 가진다. 동작 중 발열로 인해 IGBT가 동작하는 온도는 상온보다 훨씬 높게 형성되며, 방열 계통에 문제가 생기면 파손으로 연결되며, 동작 온도가 높을수록 사용 수명은 단축된다.

일반적으로 알려진 반도체 소자의 반영구적 수명과는 달리 IGBT와 같은 전력소자들이 제한 수명을 가지는 이유는 대전류 도통에 따른 발열 과다에 기인한다. 그림 2(a)에 보이는 바와 같이 주 전류 도통 경로에 P+ 층과 N+ 층이 접하는 부분이 있고, N- 층과 P 층이 접하는 부분이 있고, 콜렉트와 이미터는 단자 금속과 접합되는 부분이 있는데, 이들 부분에 결함이 증폭되면 열화 된 특성을 나타내고, 이들 결함은 정상적인 사용에도 불구하고 소자가 파손되는 결과를 가져오는 직접적인 원인이 된다.

열화된 IGBT는 절연 내전압이 낮아지는 특성을 가짐과 동시에 OFF 상태 누설 전류가 높아지는 특성을 가지는 것으로 알려져 있다. 누설전류의 증가는 정상소자에 비해 보다 높은 발열량을 가지며, 발열 과다는 열화 가속과 더불어 열폭주로 인한 갑작스런 파손으로 연결될 수 있다. IGBT 소자는 온도가 높아질수록 정격 전류 용량이 낮아지는 이유가 바로 열폭주 파손 가능성과 절연 내압 강하 파손 가능성 때문이다. 열화 IGBT의 전압- 전류 특성 분석을 통해 사용 중인 IGBT 소자의 열화 경과를 파악할 수 있다면 갑작스런 설비 고장을 예방할 수 있으며, 설비 고장으로 발생되는 인적, 물적 손실을 저감시킬 수 있다.

2.2 IGBT 진단 장치 설계

열화된 IGBT는, 전술한 바와 같이, 절연 내압이 낮아지고 OFF 상태 누설전류가 높아진다. 설계된 IGBT 진단 장치는 IGBT의 I-V 특성 곡선 확보를 기반으로 하여 그림 5와 같은 구조를 가진다.

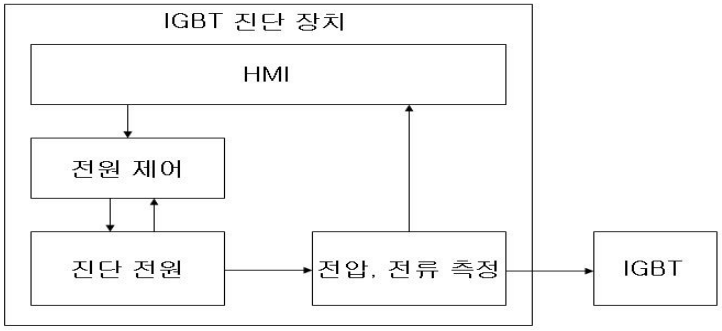
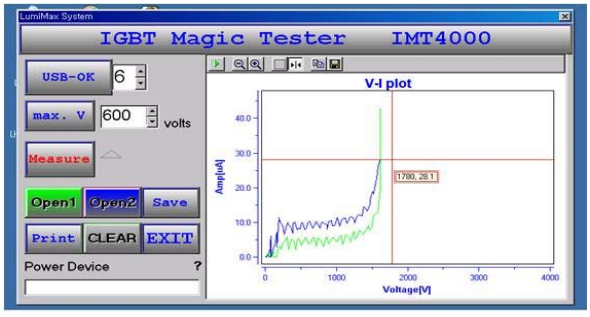


그림 5. IGBT 진단장치의 설계 구조

진단 전원은 산업계에 널리 사용되는 IGBT의 정격 전압을 고려하여 최고 4kV까지 가능하며, 최대 허용 전류는 400㎂로 설계되었고, 전원 제어부는 진단 전원의 제어 및 보호를 담당한다. 전압, 전류 측정부는 IGBT에 인가되는 전압 전압 및 도통 전류를 정확히 측정하여 HMI로 전달하는 기능을 가진다. HMI는 Notebook PC로 구성되는데 사용자의 명령에 따라 전원을 제어하고 측정 전압, 전류 신호를 분석하는 기능을 가진다. 그림 6(a)는 구현된 IGBT 진단 장치의 실물 형상을 보여주며, 그림 6(b)는 HMI 화면을 보여준다. 내부 하드웨어와 HMI PC와의 연결은 USB로 이루어지도록 제작되었으며, 사용자는 HMI 화면에서 진단 전압만 결정하여 측정 아이콘을 클릭하면 진단 결과를 획득할 수 있다. 진단 결과는 HMI 화면에서 즉시 분석이 가능하며, PC내에 저장되어 관리되며, 프린터 출력도 가능하다.

(a)IGBT 진단장치의 구현 모습



(b)IGBT 진단장치의 HMI 화면

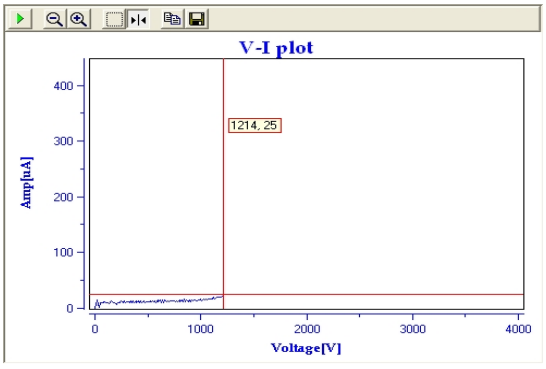
그림 6. IGBT 진단장치의 구현

기본적인 진단 기법은, 내전압 성능 강하 확인과 누설전류 증가이며, 정상 IGBT의 I-V 특성 그래프와의 비교를 통해서도 가능하다. 그림 6(b)에는 두 개의 그래프가 동시에 나타나는데, 두 그래프의 내전압 성능은 유사하게 나타나나 누설전류는 차이를 보이고 있으며, 누설 전류가 높은 IGBT가 열화가 많은 소자로 결정된다.

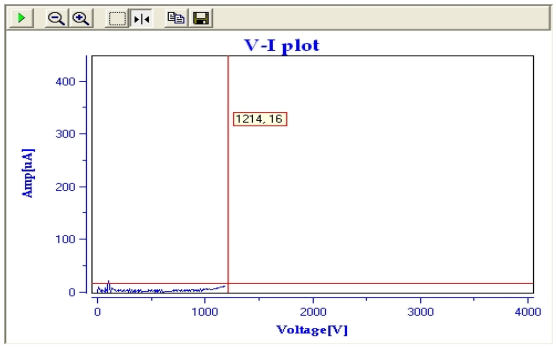
2.3 IGBT 진단 장치 실험 및 결과

다음의 그림 6, 그림 7 및 그림 8은 구현된 IGBT 진단 장치를 이용하여 실제 IGBT를 진단한 결과를 나타낸다. 그림 6(a)와 그림 6(b)는 정상 IGBT의 측정 결과인데, 내전압 성능이 1200V 이상으로 우수하고 누설 전류가 50㎂ 이하로 아주 낮게 나타난다. 그림 7(a)와 그림 7(b)는 정상적인 사용이 가능하지만 열화가 많이 진행된 IGBT의 측정 결과인데 내전압 성능은 1200V 이상으로 측정되었는데 누설전류가 250㎂로 높아진 것을 확인할 수 있다. 이러한 누설전류의 증가는 내부 접합면의 결함 내재를 나타내며 결함이 증폭되면 IGBT의 파손으로 연결된다. 그림 8은 파손으로 연결된 IGBT의 측정 결과이다. 내전압 성능이 100V 이하로 낮아졌고, 누설전류가 아주 높게 측정되었다.

개발된 IGBT 진단장치가 제공하는 I_V 특성 그래프는 아주 우수한 분해능 및 재현성을 가짐을 확인하였다. 또한 개발된 진단장치가 가지는 데이터 이력 관리 및 분석 기능을 이용한다면 IGBT의 건전성을 정확히 판단할 수 있을 통해 예상하지 못한 고장 사고를 예방할 수 있음은 물론이고, 잔존 수명 예측을 통해 예지 정비의 기반을 구축할 수 있으리라 판단된다.

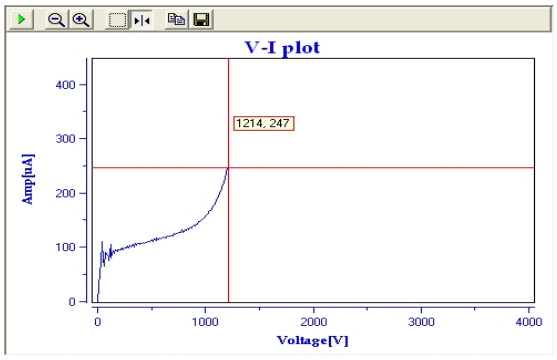


(a)정상 IGBT 1

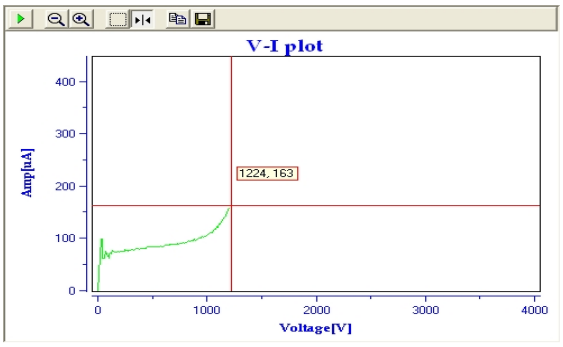


(b)정상 IGBT 2

그림 6. 정상 IGBT의 출력 그래프 예



(a)열화진행 IGBT 1



(b)열화진행 IGBT 2

그림 7. 열화진행 IGBT의 출력 그래프 예

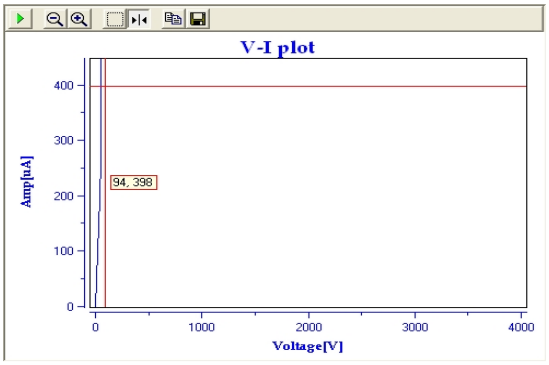


그림 8 절연파괴 IGBT의 출력 그래프 예

3. 결론

산업사회가 고도화됨에 따라 전력변환장치는 산업계 생산설비를 비롯하여 공공 설비 및 생활 가전 제품에 적용이 확대되고 있고, 이러한 전력변환장치의 고장은 인적 물적 피해 규모가 확대되고 있다. 전력변환 장치의 주요 고장 원인이 되는 IGBT와 같은 전력 소자의 열화 진행 감시는 예지 정비를 통한 전력변환 장치의 고장 예방에 기여된다.

본 논문에서는 근래에 대용량 전력변환 장치의 주요 부품으로 사용되고 있는 IGBT의 건전성 진단 기법을 제안하였고, 제안 구조로 구현된 IGBT 진단 장치의 실제 상황 테스트 수행 결과를 통해 제안된 방법이 IGBT 열화 진단에 유효함을 확인하였다. 정상 IGBT는 적절한 내전압을 유지하면서 아주 낮은 누설 전류 특성을 가지는 반면, 열화가 진행 중인 IGBT는 내전압 특성은 유지되나 누설 전류가 높아지는 특성을 가졌다. 파손으로 진행된 IGBT는 내전압 성능이 상실되고 낮은 전압에서도 아주 높은 누설 전류 특성을 가졌다.

IGBT 진단 장치의 최종 목표는 열화 진행 정도의 수치화와 잔존 수명의 예측인데 제작 진단 장치의 기능은 IGBT의 I-V 특성 곡선 확보를 통한 내전압 특성 분석 및 누설 전류 특성 분석이 주요하다. 향후 지속적인 진단 장치의 활용을 통해 사용 기가별, 용량별, 제조사별 등으로 분류되는 IGBT 특성 DB를 구축하고 이를 토대로 진단 결과를 도출한다면 신뢰도가 높은 진단 결과는 물론 정확한 잔존수명 예측까지 가능하리라 판단된다.

참고문헌

1. B. J. Baliga, "Power Semiconductor Device," PWS Publishing Com., 1998.
2. G. E. Leyh, "A critical analysis of IGBT geometries, with the intention of mitigating undesirable destruction caused by fault scenarios of an adverse nature," in Proc. Pulsed Power Conf., Dallas, pp.366-368, 2003
3. A. Hefner and D. Blackburn, " An analytical model for the steady state and transient characteristics of the power insulated-Gate Bipolar Transistors", Solid State Electronics. Vol 31, No. 10, pp1513-1532, 1988
4. Timothy J.Maloney, “Industrial Solid State Electronics”, 2nd edition, Prentics Hall, 1986
5. Moll.J.L, Su.J.L and Wang.A.C.M, “Multipliction in collector junctions of silicon npn and pnp transistor”, IEEE Tans.Electron. Devices, ED-17, pp420-423, 1970