

# 교류 전동기 구동을 위한 IPM(Intelligent Power Module) IGBT 스위치 성능 분석 방법 개발

최중경\*

## Development of IPM(Intelligent Power Module) IGBT switch performance evaluation system for the driving of the A.C. motor

Jung-Keyng Choi\*

**요약** 본 논문은 가전용 교류 전동기 구동을 위한 인버터 회로에 포함된 지능형 스위칭 모듈인 IPM 모듈에 대한 특성 및 신뢰성 계측 회로 설계 방법에 대한 연구이다. IPM은 전동기 구동기의 핵심 부품으로 그 스위칭 특성이 서보 구동 중에 일관되게 유지되어야 한다. 그 특성 중 스위치 온 특성을 결정하는 콜렉터-에미터간 도통 전압  $V_{ce(on)}$  특성이 중요하다. 인버터 구성의 핵심 부품인 IPM은 여러 브랜드의 제품이 생산되고 있기 때문에 응용시스템의 최적 성능을 위해서는 IPM의 제품군에 따른 IGBT 스위치의 콜렉터-에미터간 도통 전압  $V_{ce(on)}$  값을 측정하기 위한 방법 및 계측 평가 시스템이 필요하다. 제안된 방법은 제조사별 IPM이 전동기 구동회로에 장착된 상태에서 부하에 따른  $V_{ce(on)}$  값을 계측 평가할 수 있는 새로운 방법으로 사용자 회사 입장에서는 중요한 설비가 될 수 있다.

**Abstract** This Paper is about the study that design performance and reliability measurement circuits of the IPM which is an intelligent switching switch module included at an inverter circuits for driving of A.C. Servo motors in home appliance. IPM is a core device of motor driver and it's switching characteristics should be retained uniformly during the driving of a servo system. All of it's specification, the collector emitter switch on voltage  $V_{ce(on)}$  spec. is very important. As the IPM are core part of inverters and producing from several brands and versions, for optimal performances of application systems a method and measurement & evaluation system to measure  $V_{ce(on)}$  value, collector emitter switch on voltage, of the IPM IGBT switches with various brands are required. Especially, the proposed method can measure and evaluate  $V_{ce(on)}$  values of IPM with load at mounting state on the motor driving circuits and proposed measurement & evaluation system can be important instrument systems for IPM user companies.

**Key Words** : A.C. Servo motor, collector emitter switch on voltage, Inverter, IPM(Intelligent Power Module), Evaluation System

### 1. 서론

현재 가전제품 및 전기 차량 그리고 여러 산업용 기계 장치들의 구동에 교류 전동기가 주 액추에이터 또는 동력원으로 많이 사용되고 있다. 이러한 현대의 전동기들은 직류 전원에서 교류

구동 출력을 만들기 위해 인버터회로를 포함하고 있으며, 이 인버터 구동기는 보통 가전 응용에서는 IPM 으로 지칭되는 지능화된 IGBT 스위칭 모듈을 주 구성원으로 채택하고 있다. 이 IPM은 다양한 제조사에 의해 다양한 버전의 제품으로

This research is financially supported by Changwon National University in 2021-2022

\*Department of Electronics Engineering, Changwon National University

Received August 09, 2022

Revised August 25, 2022

Accepted August 26, 2022

생산되고 있고, 반도체 제조 기술의 발전으로 계속적으로 성능이 향상되어 출시되고 있다. 이런 이유로 새로운 모델의 적용을 위해서는 적용 대상 IPM에 관한 분석과 기존 제품과의 비교 분석 과정이 필요하다. 새로운 제품의 적용 시 제조사에서 제공되는 소자에 대한 특성 규격서를 참조하지만 적용 구동기의 구동 능력 유지 또는 향상을 위해 IPM 을 장착한 후 간단한 성능 및 특성의 확인이 필요하다. 이러한 확인을 위해 IPM의 주요 특성을 계측 분석하는 시스템의 개발이 요구된다. 특히 제품이 실제로 전동기 구동에 응용되는 회로 상에서 스위칭 동작이 이루어질 때의 특성 분석이 사용 부품의 신뢰성 판단에 적합하다. 그리고 응용 IPM 부품의 교체가 편리하고 분석 과정이 자동화되고 분석 결과를 도식적으로 보여주면서 결과 데이터를 안전하게 저장할 수 있는 통합 계측 시스템이 요구된다.

본 연구 개발에서는 가전제품에 응용되고 있는 대표적인 교류 전동기인 BLDC 전동기 제어에 사용되는 IPM 부품에 대한 스위칭 특성 분석 시스템을 제안한다. 주된 분석 특성은 IPM 내부 전력용 스위칭 소자인 IGBT의 도통 전압( $V_{ce\_on}$ ) 특성을 측정하는 것이다. 이러한 특성의 비교 분석 및 평가를 위해 디지털 시그널 프로세서인 DSP를 사용하는 측정 및 분석보드를 설계하고 새로운 특성 측정 알고리즘을 제안하며, 그래픽적인 계측, 분석, 평가 소프트웨어 판넬을 설계한다.

## 2. IPM 스위칭 분석 시스템 구조

IPM 내부의 IGBT 스위치의 성능을 분석하기 위해 설계되고 구현되어진 시스템은 아래 그림1과 같다. 시스템의 구조는 그림2에 보인다. 각종 센서 신호를 디지털화하면서 필터링하고, 성능평가 분석 소프트웨어를 구동하는 DSP 계측 제어보드와 여러 분석 대상 IPM, 계측 센서 및 전원 장치들이 장착된 테스트 보드로 구성되어 있다. DSP 계측 제어보드는 32비트급, 150MIPS 연산

능력의 고성능 프로세서를 사용하며, 전동기 구동 전용의 프로세서로 다채널 PWM 발생기, 고분해능 A/D 변환 모듈을 갖는다.[1] IPM이 장착되는 테스트 보드는 교류 상용전원을 정류하는 회로와 인버터 구동 직류 전압 생성회로, 게이트 구동 전원 및 디지털 회로 전원 공급을 위한 SMPS 회로, 3개의 제조사별 IPM 주변회로 및 착탈식 IPM 커넥터, 전동기 상전류 측정 홀센서, 센서 출력 전달 커넥터 부분이 구현되어 있다. 그리고 릴레이 보드를 채택하여 IPM 내 특정 스위칭 단을 외부에서 온오프 할 수 있도록 하였다.[2]

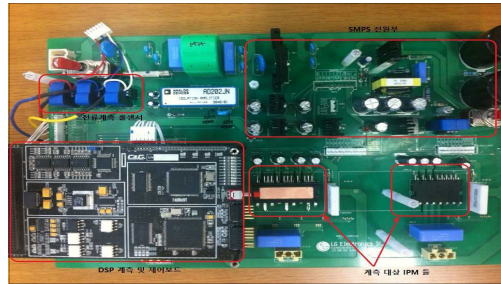


그림 1. IPM 성능평가 보드와 DSP 계측 및 제어보드  
Fig. 1. IPM Performance Evaluation Board and DSP Measurement & Control Board

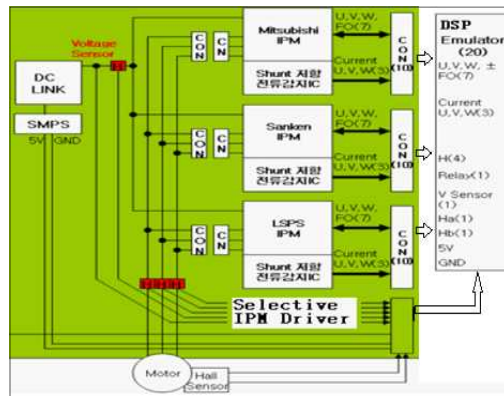


그림 2. IPM 성능평가 시스템 블럭도  
Fig. 2. IPM Performance Evaluation System Block Diagram

### 3. IPM IGBT 도통전압 측정 방법

#### 3.1 표준 저항 부하를 이용하는 측정법

그림3은 IPM 게이트 양단의 도통전압,  $V_{ce(on)}$  값을 측정하기 위해 저항 값을 알고 있는 표준저항 부하를 연결한 모습을 보여준다. 그림3에서 보여주는 연결과 같이 IPM 내 특정 상하단 IGBT 스위칭 소자에 저항 부하를 연결한 상태에서 도통 전압 측정을 위한 IGBT 스위치에 구형파와 게이트 구동 신호를 인가하여 스위치 온 시에 표준 부하에 흐르는 전류를 측정한다. 이미 알고 있는  $V_{dclink}$  전압과 부하저항 값 그리고 측정전류를 통해 해당 IGBT의  $V_{ce(on)}$  전압을 계산한다.[3]

$$V_{ce(on)} = V_{dc\_link} - (\text{측정전류} \times \text{부하저항}) \quad (1)$$

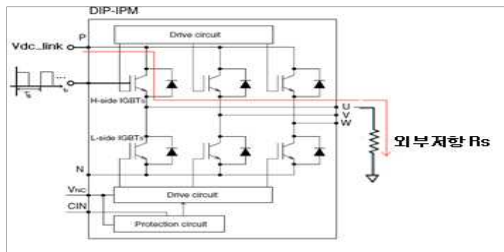


그림 3. IPM 과 표준부하의 연결  
Fig. 3. Connection of IPM and Standard Load

하지만 이 방법으로 IPM 내부의 6개 IGBT에 대해 위와 같은 계산법을 적용하여  $V_{ce(on)}$  도통 전압을 여러 번 측정한 경우 인버터 내부 6개의 IGBT 마다 모두 다른 값으로 나타났다. 콜렉터 전류를 2A에서 4A 사이 값으로 도통시키는 경우  $V_{ce(on)}$  값은 1.1V에서 1.2V 사이 값이 나와야 되는데 IGBT 별로 최대 1V 까지 편차가 발생하였다. 측정이 정확하다면 6개의 IGBT 모두 큰 편차 없이 데이터시트 상에서 제시한 값과 유사하게 나타나야 한다. 여러 분석을 통해 결국 알아낸 것은 인가전압과 IGBT 그리고 부하저항 경로상의 동박 패턴저항이 그림4와 같이 각 스위치마다 서로 다르게 존재하기 때문이었다.

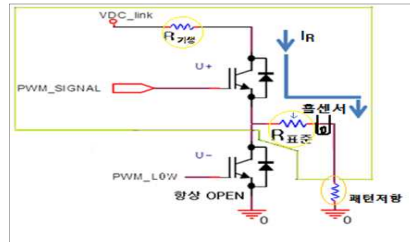


그림 4. IPM 과 표준부하의 연결  
Fig. 4. Various Parasitic Resistances on the Course of Current Path

#### 3.1 실제 부하 조건에서의 측정법

그림5는 IPM 내 특정 상하단 IGBT에 교류 전동기 부하를 연결한 상태에서 게이트 구동 신호를 인가하여 전동기 부하에 흐르는 정상상태 전류를 측정하는 연결 모양을 보여준다. 이런 제한된 측정 회로 연결 역시 IGBT 스위치 하나만 부하로써 작동하는 것이 아니라 DC 링크 전원단에서 상단 IGBT를 거쳐 전동기를 통과한 후 하단 IGBT를 경유하여 그라운드에 흐르는 전류를 측정하게 되어 있어 경로상에 전류의 흐름에 영향을 줄 수 있는 기생 부하들이 많이 존재하게 된다. 제안된 방법은 측정 타겟인 IGBT 만을 이용하여 부하와 연결하는 것이 아니라 각 IGBT 마다 측정용 보조 릴레이 스위치를 컬렉터와 에미터 단 사이에 배치하는 방법을 사용한다. 이 릴레이 스위치의 역할은 그림6과 같이 도통 시 IGBT 온 전압인  $V_{ce(on)}$ 을 측정할 목표 IGBT 대신 상하단 릴레이 스위치를 동시에 온시켜 경로상의 기생 저항 및 패턴저항 그리고 부하저항을 포함하는 등가 정상상태 저항을 측정하기 위한 것이다.

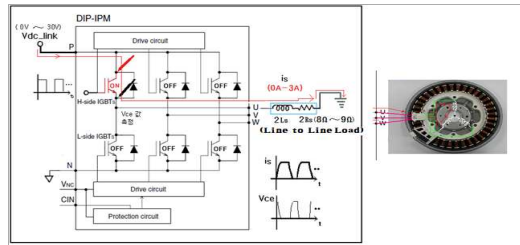


그림 5. IPM 과 3상 교류 전동기의 연결  
Fig. 5. Connection of IPM and 3 Phase AC Motor

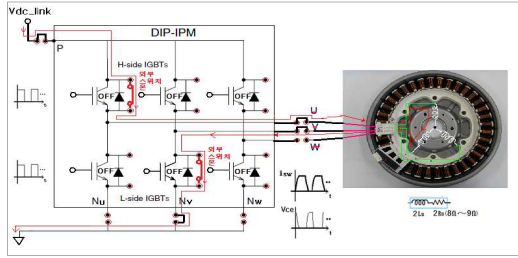


그림 6. 릴레이를 통한 경로 저항 측정을 위한 IPM 과 3상 교류 전동기의 연결

Fig. 6. Connection of IPM and 3 Phase AC Motor Load with Relay Switch to measure Path Resistance

그림6에서와 같이 U상의 상단 릴레이 스위치에서 V 상의 하단 스위치를 경로로 하여 실제 부하에 전류를 흘릴 때 전류의 정상상태 값( $I_{sw}$ ) 측정이 정확하게 이루어진다면 다음 수식과 같이 부하 직류저항을 포함하는 경로 상 저항 합 값의 측정이 가능해진다.

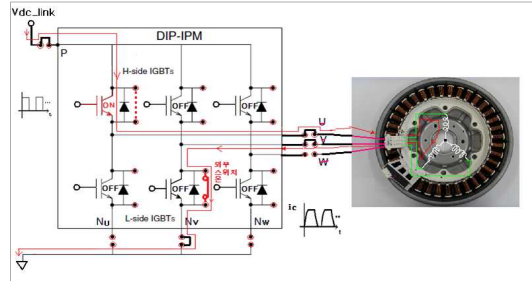
$$(R_p + R_m) = Vdc\_link / I_{sw} \quad (2)$$

( $R_p$ 는 경로상 부가 저항,  $R_m$ 은 전동기 직류저항,  $I_{sw}$ 은 정상상태 계측전류)

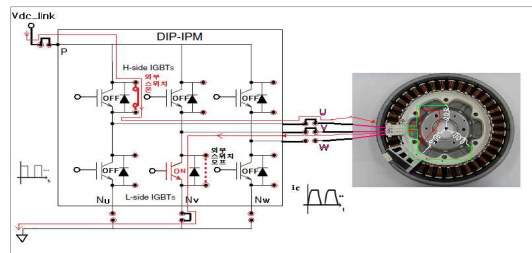
이렇게 릴레이 스위치를 이용하는 경로상 저항 값을 측정 한 후 그림 7과 같이 해당 경로상의 실제 계측 대상 IGBT와 나란히 결선된 릴레이를 끊고 대상 IGBT와 반대편 릴레이 만을 온시켜 실제 IGBT 도통 전류( $I_C(on)$ )를 측정한다. 이 측정전류와 먼저 계산된 경로 저항값을 이용하여 도통 전압  $V_{ce}(on)$ 을 계산한다.

$$V_{ce}(on) = Vdc\_link - [I_C(on) * (R_p + R_m)] \quad (3)$$

( $I_C(on)$ 는 경로상 측정 대상 IGBT를 온 하여 계측한 정상상태 전류)



(a) 상단 IGBT 스위치의 도통 전압  $V_{ce}(on)$  측정  
(a) Measurement of Higher Switch  $V_{ce}(on)$



(b) 하단 IGBT 스위치의 도통 전압  $V_{ce}(on)$  측정  
(b) Measurement of Lower Switch  $V_{ce}(on)$

그림 7. 모터 부하조건에서의 정상상태 전류 검출을 위한 홀 센서와 릴레이를 이용하는  $V_{ce}(on)$  계측

Fig. 7. Measurement of  $V_{ce}(on)$  using Relay and Hall Sensor for Sensing of steady state Current under the Motor Load Condition

#### 4. 계측 실험 결과

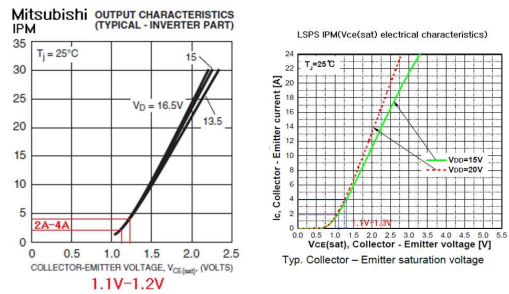


그림 8. 데이터시트 상에서 공개된 IGBT의 출력 특성

Fig. 8. Output Characteristics of IGBT in the IPM Opened at Data sheet

위 그림 8은 실제 측정 대상인 2종류 IPM의 컬렉터-에미터 간 도통 전압( $V_{ce}(on)$ )과 컬렉터 도통 전류( $I_C(on)$ )의 관계를 각 회사에서 그래프로

제시한 데이터이다.[4-5] 실험의 목적은 각 제조사 별로 제시된 데이터시트 상의 위 규격들이 실제 구동 시에도 잘 지켜지는지의 신뢰성 판단 실험이다. 그림 9에 제안된 방법을 구현하기 위한 릴레이 모듈과 전류센서가 설치된 실 계측 시스템을 보인다.

그림10의 PC 패널 프로그램 화면은 GUI(Graphic User Interface) 방식으로 PC 상에서 계측제어 시스템을 직접 제어하여 얻은 계측 결과를 보여주는 화면이다. 이 화면은 여러 결과들을 보여줄 수 있도록 디자인되었는데 그중 이번 논문과 관계된 부분은 그림 속 ①, ②, ③번 부분의 데이터이다. ①번 부분은 측정 대상의 IGBT를 적색으로 보여주는 부분이며, ②번 부분은 측정을 통해 얻은 IGBT 전류 순시 값( $I_c$ )과 IGBT 컬렉터-에미터 간 전압 순시 값( $V_{ce}$ )을 선택해서 확대해서 보여주는 창이다. 이 창들은 주로 전류 계측파형의 형태와 인가 시간 확인용이다. ③번 창은 주요 계측 대상인  $V_{ce}(on)$ 과  $I_c(on)$ 을 좌표로 도시한 것과 전류 도통 단계별 실 계측 값을 동시에 보여주는 창이다. 직류 링크 전압을 5V 씩 단계적으로 상승시키면서 계측하였으며 여러 번(3번) 반복 계측한 결과를 그래프와 측정값으로 동시에 보여준다.

전반적인 계측은 실제 8.8옴 정도의 순간 직류 저항을 갖는 전동기 부하 조건에서 수행한 실험과 0.5옴 정도의 표준저항 부하를 사용한 실험으로 나눌 수 있다. 사용한 가변 직류 전원공급기의 출력 제한성(105W, 35V 최대)으로 인해 컬렉터 전류를 15A 이상 충분히 도통시키기 위해 낮은 저항 부하(0.5옴)를 사용하는 실험이 필요하였다. 초기에 측정 IGBT 경로상의 전체 등가저항을 구하기 위해 릴레이 온 후 약 7ms 지연 후 70ms 동안 필터링된 정상상태 도통 전류를 1000번 측정한 후 평균값을 취하였다. 그 후 100ms의 휴식 시간 뒤에 300ms 동안 도통 전류를 흘리고 그 후반부의 150ms 동안 반복 측정된 평균치를 구한 후 식(3)의 계산식을 이용

하여  $V_{ce}(on)$ 을 계산하였다.

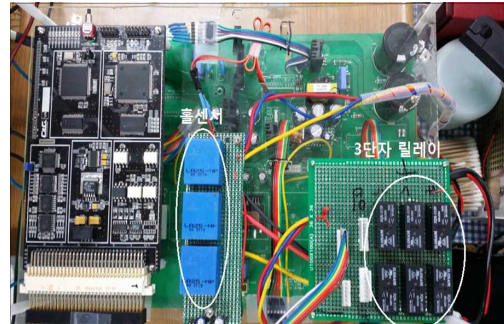


그림 9. 릴레이 모듈과 홀센서를 갖는 계측 시스템  
Fig. 9. Measurement System having Relay Module and Hall Current Sensors

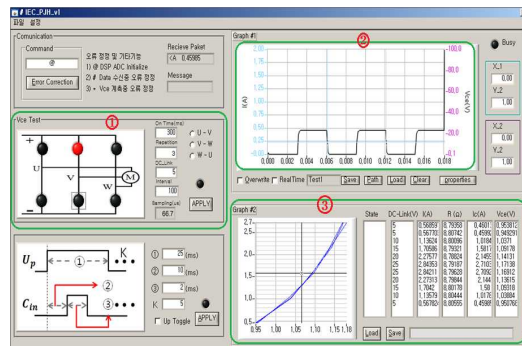


그림 10. M사의 IPM에 대한 출력 특성 계측 결과  
Fig. 10. The Result of Measurement about Output Characteristics in the M Company IPM

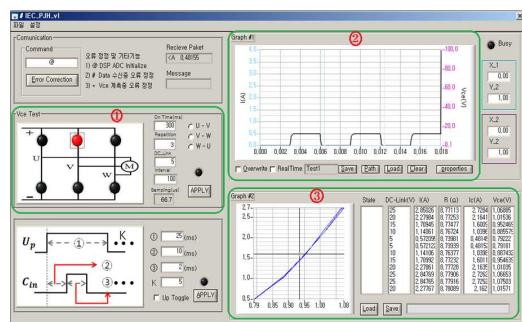


그림 11. L사의 IPM에 대한 출력 특성 계측 결과  
Fig. 11. The Result of Measurement about Output Characteristics in the L Company IPM

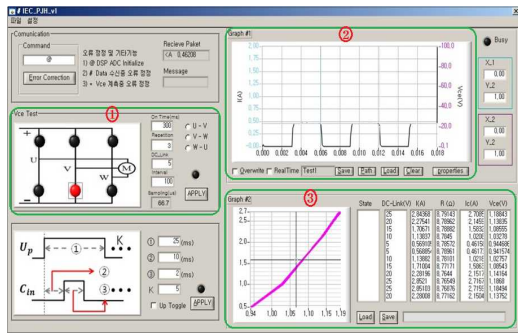


그림 12. S 사의 IPM 에 대한 출력 특성 계측 결과  
 Fig. 12. The Result of Measurement about Output Characteristics in the S Company IPM

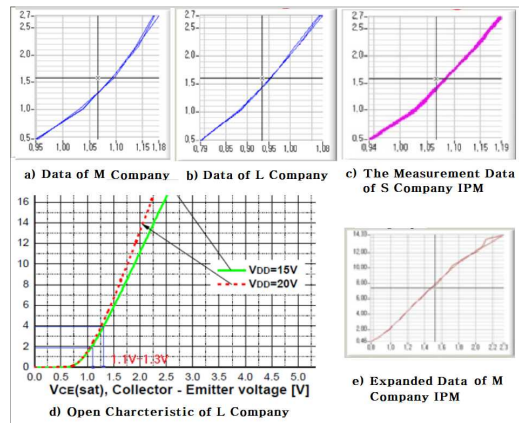


그림 14. IPM에서 IGBT 의  $V_{ce(on)}$  전압과  $I_C(on)$  전류와  
 의 관계 데이터를 측정 한 결과 그래프들  
 Fig. 14. The Graphs of measurement result on the data of IGBT  $V_{ce(on)}$  and  $I_C(on)$  in the IPM

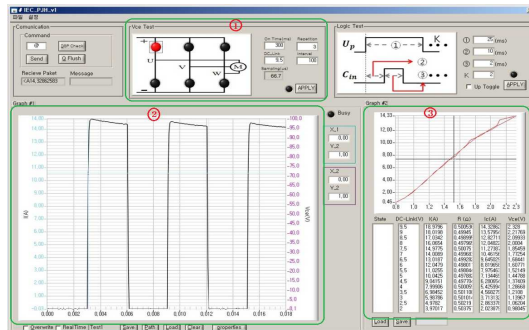


그림 13. M 사의 IPM 에 대한 출력 특성 계측 결과(전류 증가  
 를 위해 0.5옴 표준 저항 부하를 사용한 경우)  
 Fig. 13. The Result of Measurement about Output Characteristics in the M Company IPM (In case of 0.5 Ohm standard resistive Load for Increasing C urrent)

그림14는 각 IPM 에 대한  $V_{ce(on)}$  수평축 값과  $I_C(on)$  수직축 값의 상관관계를 보다 자세히 보여주기 위해 이전 그림들의 통합 계측 창에서 제시되었던 실험 결과 그림을 확대해서 보여주는 그림이다. 그림 14의 (d) 부분은 특정 제조사의 데이터시트 상의 특성 그래프를 확대 한 것이고 나머지는 제조사별로 제안된 방법으로 계측 실험 한 결과 그림을 확대한 것이다.

### 5. 결 론

그림10~12는 3개 브랜드의 IPM 에 대해 설계된 계측 시스템과 제안된 계측 방법을 이용하여 IGBT 스위칭 소자의 개별적인 도통 특성을 계측한 결과를 보인다. 전동기 부하 조건에서 5V 에서 25V 까지 DC 링크 전압을 5V씩 단계적으로 상승시키면서 제안된 방법으로 스위칭 소자 양단의 도통 전류와 도통 시 전압을 3번 반복 측정 한 결과이다. 특성 곡선 결과가 데이터 시트 상의 결과와 크게 차이가 나지 않음을 알 수 있다. 그림 13은 컬렉터 전류의 상승을 위해 부하를 전동기 부하에서 0.5옴 저항 부하로 바꾸어 전류를 15A 정도까지 상승시켜 실험한 결과이다.[6-7]

본 연구 개발에서는 가전용 교류 전동기 구동을 위한 인버터 회로에 포함된 지능형 스위칭 모듈인 IPM 모듈에 대한 특성 및 신뢰성 계측 회로 설계 방법 및 계측 알고리즘을 제안한다. 현재 판매, 사용되고 있는 3개 제조사의 IPM 모듈에 대한 내부 IGBT 스위치의 게이트 양단 도통전압( $V_{ce(on)}$ ) 측정 방법을 제시한다. 이 스위치 양단 도통 전압 측정을 DSP 계측 제어보드 설계를 통해 사용자가 직접 측정할 수 있는 방법을 제시한다. 계측을 자동화하였고, 모듈 내에 묻혀있는 소자에 대한 특성 측정 방법을 제안하였으며, 기본 실험실 환경에서 쉽게 측정할 수 있는 방법을 제시한다. 이 방법을 응용하면 실

부하조건에서 IPM이 전동기 구동기 보드에 장착된 상태에서도 측정이 가능하다. 주변 환경의 변화 특히 온도변화나 측정을 위한 결선 형태의 변화에도 유연하게 대처할 수 있는 방법이다.

## REFERENCES

- [1]. Texas Instruments, "TMS320F28335 Peripherals Ref. Guide", June 2017, Available: [https://mil.ufl.edu/3744/docs/TI\\_DSP/TI-docs/spru566i.pdf](https://mil.ufl.edu/3744/docs/TI_DSP/TI-docs/spru566i.pdf)
- [2] R. E. Thomas, A. J. Rosa, The Analysis and Design of Linear Circuits, 9th ed. New Jersey, NJ: Prentice-Hall, 2019.
- [3] B. C. Kuo, Automatic Control Systems, 10th ed, New Jersey, NJ: McGraw-Hill, 2017.
- [4] PS21964-4S Data Sheet (POWEREX, Inc.), Available: [https://www.mitsubishielectric-mesh.com/products/pdf/ps21964-4s\\_e.pdf](https://www.mitsubishielectric-mesh.com/products/pdf/ps21964-4s_e.pdf)
- [5] IKCM15H60GA Data Sheet (LS Power Semitech, May.2017), Available: <https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-1KCM15H60GA>
- [6] Sang-Hoon Kim, DC, AC, BLDC Motors, 3rd ed, Bogdoo, 2018.
- [7] UI-Chel Noe, Gue-Bum Jueng, Nam-Seb Choi, Power Electronics, 4th ed, Munundang, 2019.

## 저자약력

### 최 중 경 (Jung-Keyng Choi)

[정회원]



- 1986년: 고려대학교 전기공학과 공학사
- 1988년: 고려대학교 전기공학과 공학석사
- 1992년: 고려대학교 전기공학과 공학박사
- 1992년~현재: 국립 창원대학교 전기전자제어공학부 전자전공 교수

〈관심분야〉 measurement, intelligent control, servo motor control, electronic circuit design