

60W 출력을 가지는 반도체 소자의 직류 특성 측정시스템의 구현

최인규, 최창, 한혜진*, 박종식
 경북대학교 전자공학과, *울산기능대학 정보통신설비과

Implementation of the 60W DC Characteristic Measurement System for Semiconductor Devices

In-Kyu Choi, Chang Choi, Hye-Jin Han*, Jong-Sik Park

Dept. of Electronic Engineering, Kyungpook National University

*Dept. of Information and Data Communication, Ulsan Polytechnic College

Abstract - In this paper, we designed and implemented the 60W DC characteristic measurement system for semiconductor devices. The proposed system is composed of 2 SMU(Source and Measure Unit)s, 2 HPU(High power Unit)s, 2VSU(Voltage Source Unit)s, and 2 VMU(Voltage Measurement Unit)s. HPU can source/measure voltage from -200V to 200V and source/measure current from -3A to 3A within 60W. Experimental results show that the implemented system can measure the power devices such as power BJT, regulator IC, and voltage detector.

1. 서 론

컴퓨터, 로보트, 통신장비의 보급 증가에 따라 power BJT, power MOSFET, voltage regulator, voltage reference, voltage detect등의 전력용 반도체 소자는 그 수요가 증가하고 있다. 전력용 반도체 소자는 일반적인 반도체 소자에 비해 용량이 크기 때문에 특성 측정을 위해서는 높은 전압 및 전류를 인가하고 측정할 수 있어야 한다. 전류가 커질수록 전원 회로에서 공급하여야 하는 전력이 커지므로 발생하는 열이 증가하기 때문에 이에 대한 대책이 필요하며 케이블 저항에 의한 측정 오차도 발생하게 된다. 전류가 커질수록 전원 전압을 낮게 하거나 여러 개의 MOSFET을 직렬 또는 병렬로 연결시킴으로써 전원 회로의 각 소자에 걸리는 전력을 감소시킬 수 있다[1]. Power MOSFET은 스위칭 속도가 빠르고 도통 저항이 작으며 바이어스 전류가 작은 장점이 있기 때문에 고전류 시의 스위치로 적합하다[2].

본 논문에서는 전력용 반도체 소자의 직류 특성을 측정하기 위해 최대 60W의 출력을 가지는 측정 시스템을 구현하였다. 이러한 특성 측정은 DUT(Device Under Test)에 전류를 인가하고 전압 측정 값을 저장하거나 전압을 인가하고 DUT에 흐르는 전류를 측정하는 방식으로 이루어진다[3][4]. 구현된 시스템에서는 최대 전압 200V, 최대 전류 3A를 60W의 범위내에서 DUT에 인가 및 측정이 가능하도록 설계하였다. 또한 전원 회로에서 발생하는 열을 감소시키기 위해 출력 전류가 증가함에 따라 낮은 전압을 가지는 전원으로 전환되도록 설계하였다. 전류의 도통을 제어하기 위해서는 낮은 도통 저항을 가지는 power MOSFET을 사용하였으며 케이블에 의한 전압 강하를 방지하기 위하여 Kelvin sensing을 사용하였다.

구현된 시스템에서는 인가 전압이나 전류를 일정 간격으로 변화시키면서 특성을 측정하는 스위프 모드 측정이 가능하며 실험을 통하여 voltage regulator, voltage

reference, voltage detect, power BJT 등의 소자에 대해 오차범위에서 측정이 이루어짐을 확인하였다.

2. 측정 시스템의 구현

그림 1에 구현된 직류 특성 측정 시스템의 블록도를 나타내었다. 측정 조건 설정 및 측정값 분석은 PC에서 GUI를 통해서 이루어진다. 마이크로프로세서는 GUI와의 통신을 통해 측정 조건과 측정 결과를 교환하고 측정부에 측정 조건을 설정하는 역할을 한다. SMU(Source and Measure Unit) 및 HPU(High Power Unit)는 마이크로프로세서의 설정에 따라 전류 인가/전압 측정, 전압 인가/전류 측정 등으로 동작하며 VSU는 전압 인가, VMU는 전압 측정의 기능을 한다. SMU, HPU와 VMU의 인가값 및 제한값은 DAC를 통하여 설정되며 측정값은 ADC를 통하여 디지털로 샘플링된 후 마이크로프로세서를 통해 PC로 전송된다. SMU 2채널, HPU 2 채널, VSU 2채널을 사용하여 최대 6채널을 통해 DUT에 바이어스를 설정할 수 있다. 측정 또한 SMU 2채널, HPU 2 채널, VMU 2채널을 사용하여 최대 6 채널을 통해 이루어진다. SMU는 2W 범위 내에서 최대 100V, 100mA까지 인가하거나 측정할 수 있으며 pA 수준의 정밀한 측정이 가능하다. HPU는 60W 범위 내에서 최대 200V, 3A까지 인가 및 측정이 가능하도록 설계하였다.

2.1 SMU

SMU는 반도체 소자에 전압을 인가하고 전류를 측정하거나 전류를 인가하고 전압을 측정한다.

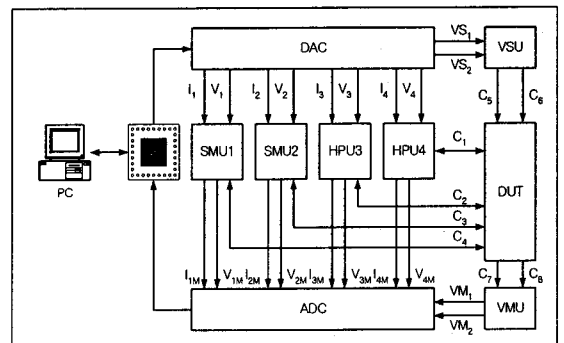


그림 1. 직류 특성 측정 시스템의 블록도.

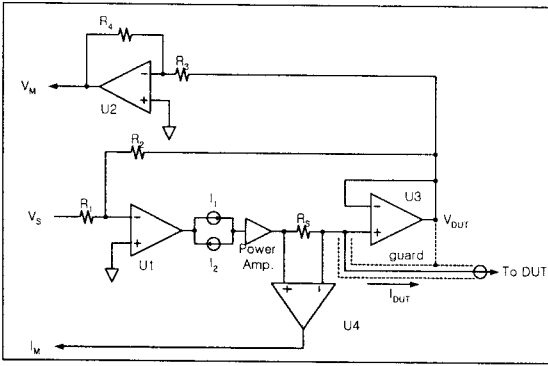


그림 2. 전압인가/전류측정을 위한 SMU 블록도.

그림 2에서는 전압을 인가하고 전류를 측정하는 경우의 블록도를 나타내었다. DA변환부에서 입력되는 전압 V_S 는 U1에서 증폭된 후 U3를 통하여 DUT로 인가된다. 이 때 DUT에 인가되는 전압은 (1)과 같다.

$$V_{DUT} = -\frac{R_2}{R_1} V_S = -aV_S \quad (1)$$

a 는 R_1 의 값에 따라 2와 4, 10의 값을 가지며 최대 100V까지 DUT에 인가하거나 측정할 수 있다.

DUT에 흐르는 전류는 R_S 를 통하여 흐르게 되므로 R_S 양단의 전압 강하를 측정함으로써 전류를 계산할 수 있다. R_S 양단의 전압강하는 (2)와 같다.

$$I_M = I_{DUT} \times R_S \times \beta \quad (2)$$

β 는 U4의 전압 이득으로 1 또는 10의 값을 가진다. R_S 는 10 Ω , 1K Ω , 100K Ω , 10M Ω 그리고 1G Ω 중 마이크로 프로세서에 의해 선택되며 인가 및 측정이 가능한 최대 전류는 100mA이다.

전류 측정 시에는 누설 전류와 유도 전류에 의해 주로 측정 오차가 발생하게 된다[5]. 유도 전류는 외부에서 전기장에 의해 케이블에 유도되므로 triaxial cable을 사용하여 이를 최소화 되도록 하였다[6]. 누설전류는 전류 측정 회로의 각 지점에서의 전위 차이 때문에 발생하게 되는데 케이블이나 커넥터, 릴레이는 물론 절연체에서도 누설 전류가 발생할 수 있다. 이를 방지하기 위해서 케이블이나 스위치는 적어도 10¹⁴ Ω 이상의 저항을 가지도록 하였고 U3 및 U4등의 연산증폭기는 100fA 이하의 입력 바이어스 전류를 가지는 연산증폭기를 사용하였다. 또한 guard를 사용하여 민감한 측정 도선을 둘러싸고 있는 절연체와의 전위차를 거의 0이 되도록 하여 누설 전류를 감소하도록 하였다.

측정 회로에서 오차는 DA변환기와 AD변환기, 연산증폭기의 이득 오차, 오프셋 전압 등에 의해서 발생한다. 이러한 오차는 보정(Calibratoin)을 통해 제거할 수 있다 [7][8][9].

DUT에 인가되는 전압은 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_{DUT} = -\alpha_1 \times V_{DAC} + V_{OS1} \quad (3)$$

여기서 V_{DUT} 는 DUT에 인가되는 전압을 AD 변환한 값을 나타내며 V_{DAC} 는 DA 변환기의 출력 전압을 나타낸다. α_1 는 전압 인가 회로의 이득을 나타내며 V_{OS1} 는 오프셋 전압을 나타낸다.

DUT에서 측정된 전압은 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

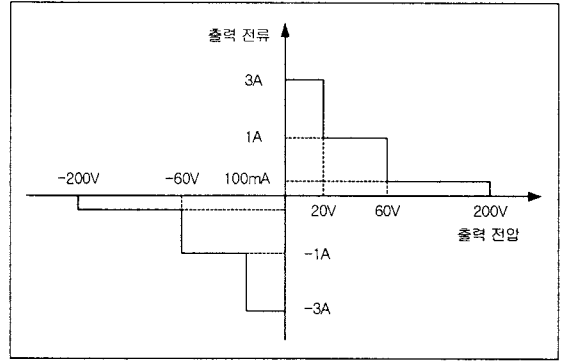


그림 3. 출력 전압 및 전류.

$$V_{ADC} = -\gamma_1 \times V_{DUT} + V_{OS2} \quad (4)$$

γ_1 는 전압 측정 회로의 이득을 나타내며 V_{OS2} 는 오프셋 전압을 나타낸다.

마이크로 프로세서는 일정 시간마다 주기적으로 보정을 실행하여 측정값으로부터 α_1 , V_{OS1} , γ_1 그리고 V_{OS2} 값을 구하여 저장한다. 보정 과정을 통해 얻어진 파라미터는 측정시에 인가값 및 측정값을 계산하는데 사용된다. DUT에 인가 시에는 DA변환기의 이득 오차 및 오프셋, 그리고 인가 회로 이득 및 오프셋을 고려하여 DA변환기의 설정값을 결정한다. 또한 AD변환기를 통해 변환된 값은 측정 회로의 이득 및 오프셋 전압과 AD변환기의 이득 오차 및 오프셋을 고려하여 실제 측정값을 계산하여 측정 회로가 가지는 오차를 제거한다.

2.2 HPU

HPU는 전원 회로와 power amp., MOSFET 스위치 등 일부분을 제외하고는 SMU와 동일한 기본 구조를 가지며 최대 출력이 60W를 가지도록 구현하였다. 그림 3에서는 구현된 측정 시스템에서 HPU의 출력 전류에 따른 최대 출력 전압을 나타내었다.

2.1.1 전원 회로

최대 3A의 전류를 DUT에 인가하기 위해 단일 전원을 사용할 경우 전원의 출력 전력이 커져야 할뿐만 아니라 전류가 증가함에 따라 전원 회로에서 소모되는 전력이 커지기 때문에 열 발생의 문제가 생길 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 구현된 시스템에서는 출력 전류에 따라 3개의 독립된 전원 중의 하나가 선택되는 구조를 사용하였다. 그림 4에 HPU의 전원 선택 회로를 나타내었다.

DUT에 인가되는 전류(I_{DUT})가 증가함에 따라 R_3 의 양단 전압이 증가하다가 Q3의 베이스-이미터 도통 전압보다 커지게 되면 Q1, Q2가 차단되어 +90V에서 전류를 공급하게 된다.

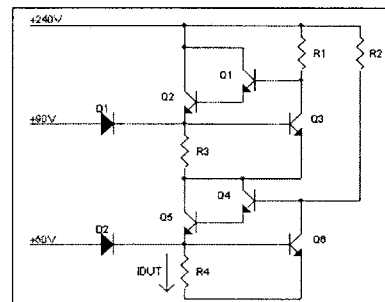


그림 4. 전원 선택 회로.

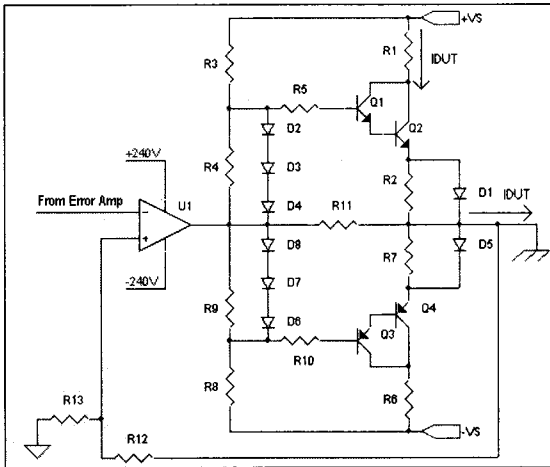


그림 5. Power Amp. 회로.

그리고 R4에 걸리는 전압이 차츰 증가하다가 Q6의 베이스-이미터 도통 전압보다 커지게 되면 Q4, Q5가 차단되어 +50V 전원에서 전류를 공급하게 된다. +240V 전원은 Q3과 Q4가 차단된 경우에 전류를 공급한다.

구현된 시스템에서는 +240V 전원에서 최대 130mA, +90V 전원에서는 최대 1.3mA, +50V 전원에서는 최대 3A까지 공급하도록 R3과 R4를 선택하였다.

2.1.2 Power Amp.

그림 2에서 power amp. 회로는 DUT에 흐르는 전류를 공급하며 R_5 에서의 전압 강하를 고려하여 210V 이상의 출력을 가져야 한다. 전압 증폭을 위해서는 900V 출력이 가능한 하이브리드 IC형 연산증폭기를 사용하고 출력단에 전류 부스터(Current Booster)를 추가하여 전원 회로에서 공급되는 전류가 DUT로 흐르게 하였다. 그림 5에 power amp.의 회로를 나타내었다.

연산증폭기(U1)는 error amp의 출력 전압을 증폭하여 R_5 를 통하여 DUT에 인가하고 출력단의 전류 부스터의 바이어스 전류를 공급해주는 역할을 한다. DUT에 공급되는 전류는 +VS로 전원회로에서 유입되는 전류가 Q1, Q2 또는 Q3, Q4를 통하여 흘러가게 된다. 전력 증폭기의 최대 입력 전압이 6V 정도이므로 R12와 R13은 전압이득이 40이 되도록 선택하였다.

2.1.3 MOSFET 스위치

Power-MOSFET은 스위칭 속도가 빠르고 도통 저항이 작으며 바이어스 전류가 작은 장점 이외에도 body diode가 존재하기 때문에 역방향의 전류도 통과시킬 수 있는 특징이 있다. 본 논문에서 구현된 시스템에서는 전류의 도통을 제어하기 위하여 power-MOSFET을 사용하였다. 그림 6에 MOSFET switch 회로를 나타내었다. 전류 source 시에는 Q2가 도통되어 흐르는 전류가 Q38의 body diode를 통하여 DUT에 인가된다. 전류 sink 시에는 Q1이 도통되고 Q2의 body-diode 쪽으로 전류가 흐르게 된다.

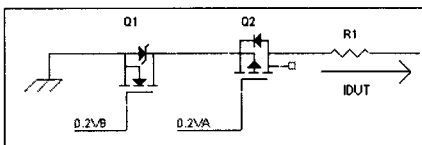


그림 6. MOSFET 스위치 회로.

따라서 R1을 사용하여 전류를 측정하는 경우 양방향으로 전류가 흐를 수 있도록 하기 위해서는 Q37과 Q38이 동시에 ON이 되도록 하였다.

2.1.4 Kelvin-Sensing 회로

고전류 측정 시 케이블의 저항에 의한 전압 강하가 발생할 수 있으므로 이를 방지하기 위하여 Kelvin Sense 회로를 사용하였다. 전류 인가 선로와 전압 측정 선로가 분리되어 고전류가 흐를 때 케이블 저항에 의한 전압 강하가 전압 측정 선로에 나타나지 않으므로 이에 의한 측정 오차가 제거된다.

3. 실험 결과

표 1에서는 0.01%의 오차를 가지는 정밀 저항을 256개의 샘플로부터 평균화를 수행하는 상태에서 보정을 사용한 경우와 그렇지 않은 경우의 측정 결과를 나타내었다. 보정을 사용하는 경우의 측정 오차가 현저히 줄어들었음을 볼 수 있다. 또한 평균화 시 주기 당 샘플수가 증가할수록 측정 오차가 감소하게 된다. 이는 전원 신호에 의한 잡음뿐만 아니라 측정 회로에서 발생하는 랜덤 에러가 감소한 결과로 생각할 수 있다.

표 1. 보정에 따른 측정 오차.

전압인가/전류측정 오차(%)		
	no calibration	calibration
1M Ω	1.76	2.78×10^{-2}
100K Ω	1.61	6.16×10^{-2}
10K Ω	1.76	2.33×10^{-1}
1K Ω	1.60	6.92×10^{-2}
전류인가/전압측정 오차(%)		
1M Ω	1.46	6.30×10^{-2}
100K Ω	1.32	7.47×10^{-2}
10K Ω	1.15	5.60×10^{-2}
1K Ω	1.51	6.81×10^{-2}

그림 7에서는 PNP power BJT인 MJE5850의 측정 결과를 나타내었다. 베이스 전류를 20mA, 30mA, 40mA로 했을 때 콜렉터-이미터 전압을 0V에서 -5V까지 200mA 간격으로 가변하면서 콜렉터 전류를 측정한다.

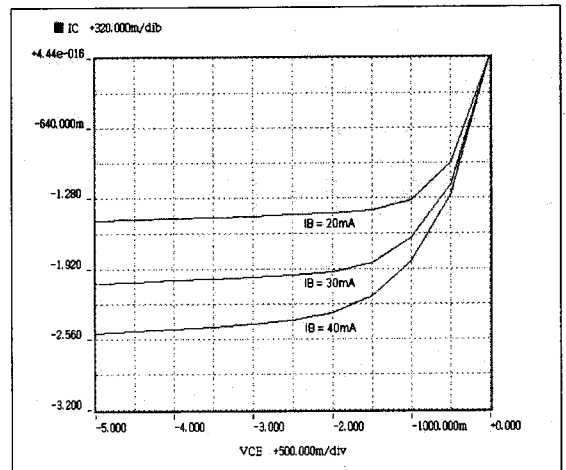


그림 7. Power BJT(MJE5850) 측정 결과.

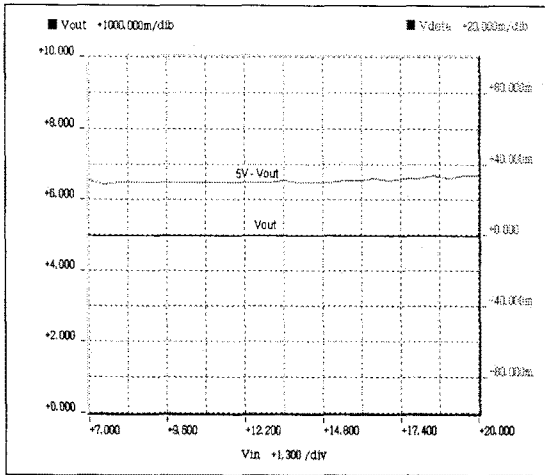


그림 8. Regulator IC(LM7805) 측정 결과.

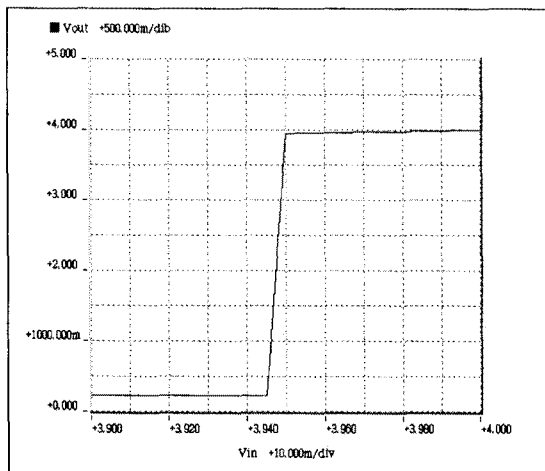


그림 9. Voltage Detect IC(KIA7039) 측정 결과.

그림 8에서는 voltage regulator인 LM7805의 입력 전압의 변화에 따른 출력 전압의 측정 결과를 나타내었다. 출력 전류를 500mA로 하고 입력 전압을 +7V에서 +20V까지 500mV 간격으로 가변하면서 출력 전압을 측정한 결과이다. Vdeta는 regulation 전압인 5V와의 차이를 나타내며 최대 33mV로 측정되어 line regulation 최대 규격인 50mV를 만족함을 확인하였다.

그림 9에서는 voltage detect 소자인 KIA7039의 측정 결과를 나타내었다. 이 소자는 입력 전압이 3.9V 이상이 되면 출력 전압이 입력 전압을 그대로 쫓아가는 동작을 하는데 입력 전압을 3.9V에서 4V까지 1mV 단위로 가변하면서 출력 전압을 측정하였다. 입력 전압이 3.95V가 되면 출력 전압이 입력 전압과 동일하게 나타남을 측정 결과로부터 확인하였다. 검출전압이 3.75V ~ 4.05V의 규격을 가지므로 측정 결과가 오차범위 내에 존재함을 알 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 전력용 반도체 소자의 직류 특성을 측정하기 위해 최대 60W의 출력을 가지는 측정 시스템을 구현하였다. 구현된 시스템은 저전류 측정을 위한

SMU, 고전력 측정을 위한 HPU, 전압 인가를 위한 VSU, 전압 측정을 위한 VMU로 구성되어 최대 12 채널을 사용하여 DUT의 직류 특성을 측정할 수 있다.

SMU는 0.3mA의 분해능으로 -100V ~ 100V의 전압을 인가/측정 가능하며, 전류는 0.1pA의 분해능으로 -100mA ~ 100mA의 범위를 인가/측정할 수 있다. HPU는 -200V ~ 200V의 전압과 -3A ~ 3A의 전류를 인가/측정할 수 있다.

실험을 통하여 power BJT, voltage regulator, voltage detector와 같은 소자들이 오차 범위내에서 측정됨을 확인하였다.

(참 고 문 헌)

- [1] P. Horowitz and W. Hill. *The Art of Electronics, 2nd Ed.*, Cambridge University Press, 1989.
- [2] Matsukawa, T., Shimada, K., Shioyama, M., et al., "Low voltage, high current DC power supply with self commutated converter using power-MOSFET," 18th Symposium on Fusion Engineering, pp. 137-140, 1999.
- [3] S.J. Wang, J.Y. Lee, and C.Y. Chang, "An Efficient and Reliable Approach for Semiconductor Device Parameter Extraction," *IEEE Trans. on CAD*, Vol. CAD-5, no.1, Jan. 1986.
- [4] A. Ortiz-Conde and F.J. Garcia Sanchez, et al., "A method to extract parameters in a generalized two-terminal device", *Southcon '94*, pp.262-265, Mar. 1994
- [5] D. Kirsop and J. Yeager, "Design considerations in low level analog test systems," *AUTOTESTCON'90 Conf. Record*, pp.577-582, 1990.
- [6] Henry W. Ott, *Noise reduction techniques in electronic systems, 2nd ed.*, Wiley, 1989.
- [7] Gene C., C. Chen, Winifred Y., C. Lin, et al., "Accurate Self-Checking Digital Teraohmmeter," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 44, no. 2, Apr. 1995.
- [8] Kolen P. T., "Self-calibration/compensation technique for microcontroller-based sensor arrays," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 43, no. 4, pp. 620-623, Aug. 1994.
- [9] Ji-Gou Liu, U. Fruhauf, and A. Schonecker, "On the application of special self-calibration algorithm to improve impedance measurement by standard measuring systems," *Proc. IMTC'99*, vol. 2, pp. 1017-1022, 1999.