

# 전력용 MOSFET 기술동향

곽 동 걸

(동해대학교 전기공학과 교수)

## 1. 머리말

전력용 MOSFET는 아날로그 및 디지털 신호처리회로들에서 개별소자 또는 직접소자의 형태로 널리 사용되고 있는 저전력용 MOSFET를 고전력용으로 만든 것이다. 최근의 고전력용 소자기술의 발달에 힘입어 고전압, 대전류용량의 고전력 소자들이 생산되고 있으며, 일반적으로 수십 암페어, 수백 볼트 정격의 개별소자들이 생산되고 있다.<sup>[1~3]</sup> n채널과 p채널 소자들 모두 만들어지고 있으나 고정격용으로는 n채널 소자가 주로 만들어진다.

쌍극성 접합트랜지스터(BJT)와 비교해보면 BJT는 전류제어소자이며, 컬렉터에 전류를 흘려주기 위해서는 베이스전류가 필요하다. 컬렉터전류는 입력전류(또는 베이스전류)에 의존하므로, 전류이득은 접합온도에 크게 좌우된다.<sup>[4]</sup> 반면 전력용 MOSFET는 전압제어소자이며, 오직 미세한 입력전류만을 요구한다. 스위칭 속도도 매우 높고 스위칭 시간도 ns정도이다. 이러한 전력용 MOSFET는 저전력 고주파용 컨버터에 이용되는 빈도가 커지고 있다. 그 결과 가전제품, OA기기 그리고 일반산업기기에 이르기까지 폭 넓게 채택되고 있다. 본 고에서는 향후 발전 기대되는 MOSFET에 대한 특성, 구동회로, 보호회로 그리고 응용회로 등에 대해서 검토하고자 한다.<sup>[5~6]</sup>

## 2. 전력용 MOSFET의 정상상태 특성

MOSFET는 전압제어 소자이고, 매우 높은 입력임피던스를 가지고 있다. 그리고 게이트에는 nA 정도의 매우 적은 누설전류가 흐르게 된다. 입력 게이트전류  $I_G$ 에 대한 드레인전류  $I_D$ 의 비율인 전류이득은 일반적으로  $10^9$ 정도가 된다. 그러나 전류이득은 중요한 파라미터는 아니다. 게이트전압에 대

한 드레인전류의 비율인 상호컨덕턴스(transconductance)는 전달특성으로 정의되며, 매우 중요한 파라미터이다.

공핍형 및 증가형 MOSFET 모두에 해당되는 정상상태 모델을 그림 1에 나타내었다.

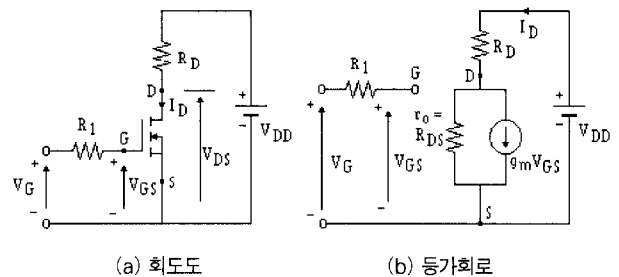


그림 1 MOSFET의 정상상태 스위칭모델

이 때, 상호컨덕턴스  $g_m$ 은 다음과 같이 정의된다.

$$g_m = \left. \frac{\Delta I_D}{\Delta V_{GS}} \right|_{V_{DS}=\text{constant}} \quad (1)$$

출력저항  $r_o = R_{DS}$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$R_{DS} = \frac{\Delta V_{DS}}{\Delta I_D} \quad (2)$$

이 값은 일반적으로 핀치-오프영역에서 매우 높으며,  $M\Omega$  정도가 된다. 또, 선형영역에서는 매우 적어서  $m\Omega$  정도가 된다. 공핍형 MOSFET 일 경우 게이트(또는 입력)전압은 정(+) 또는 부(-)의 값이 될 수 있다. 그러나 증가형

MOSFET일 경우에는 오직 정(+)의 게이트전압을 인가해야 한다. 따라서 전력용 MOSFET는 일반적으로 구동이 간단한 증가형을 이용한다.

그림 2는 n채널증가형 MOSFET의 출력특성을 나타낸다. 여기서는 세 가지 동작영역이 있다.

- (1) 컷-오프영역 ( $V_{GS} \leq V_T$ )
- (2) 핀치-오프 또는 포화영역 ( $V_{DS} \geq V_{GS} - V_T$ )
- (3) 선형영역 ( $V_{DS} \leq V_{GS} - V_T$ ).

여기서 핀치-오프는  $V_{DS} = V_{GS} - V_T$  일 때 발생한다.

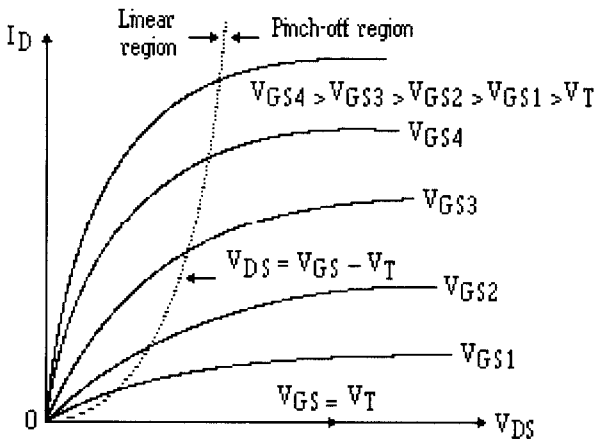


그림 2 증가형 MOSFET의 출력특성

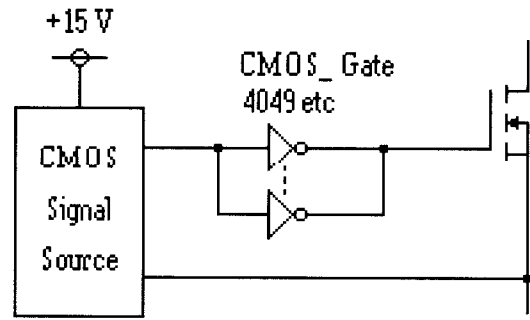
선형영역에서는 드레인전류  $I_D$  는 드레인-소스전압  $V_{DS}$  에 비례하여 변한다. 높은 드레인전류와 낮은 드레인전압에 의하여, 전력용 MOS는 선형영역에서 동작되며, 스위칭동작을 하게 된다. 포화영역에서 드레인전류는  $V_{DS}$  의 값이 증가하는 동안 거의 일정하게 유지되며, MOS는 이 영역에서 전압증폭에 사용된다.

### 3. 게이트 구동회로 동향

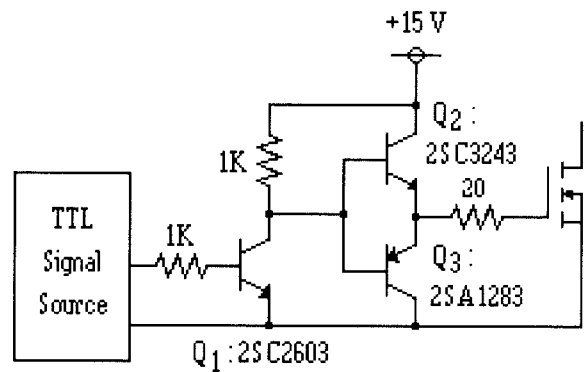
#### 3.1 게이트 구동회로

전력용 MOSFET의 빠른 스위칭 능력을 이용하고 높은 반복 스위칭 주파수를 구현하기 위해서는 급격히 상승하는 게이트펄스를 공급해 주어야 한다. 이것은 게이트-드레인간의 밀러정전용량과 게이트 소스간의 정전용량으로 인하여 큰 값의 게이트 전류펄스를 만들어 낸다.

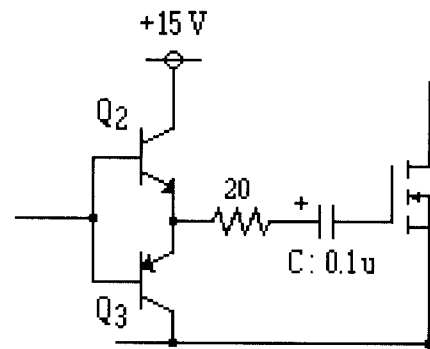
전력용 MOSFET의 구동회로 용도로 특별히 설계된 집적회로 모듈이 나와 있다. 이러한 모듈들은 급격히 상승하는 큰 전류의 전압펄스를 출력할 수 있는 능력을 가지고 있으며, 이 모듈들은 TTL 또는 MOS 로직게이트에 바로 인터페이스할 수 있고, 반전 또는 비반전 동작모드를 제공한다. 반전 동작



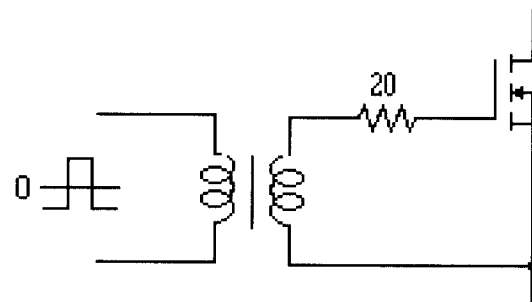
(a) CMOS 로직에 의한 구동회로



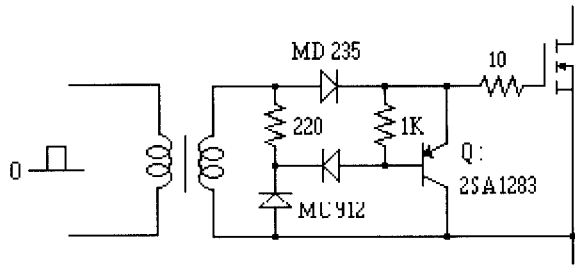
(b) 트랜지스터에 의한 구동회로(단전원)



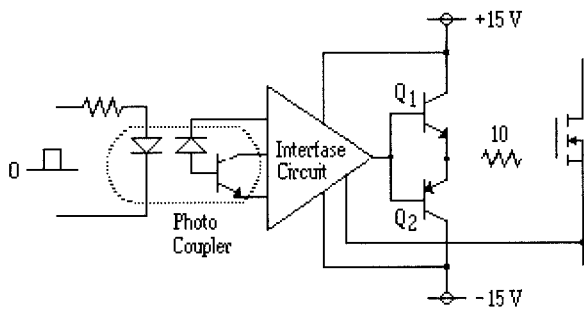
(c) 콘덴서에 의한 역바이어스 방식



(d) 펄스 트랜스 방식



(e) 펄스 트랜스 방식 (방전용)



(f) 포토커플러 절연방식

그림 3 게이트 구동회로

이란 드라이버의 입력이 논리레벨 0이 될 때, 드라이브의 출력은 1이 되는 것을 의미한다.

MOSFET 게이트 구동회로를 그림 3에 나열하였다. 그림 3(a)는 단일극성의 전원을 이용한 CMOS 게이트 구동회로 방식이다. 그림 3(b)는 MOSFET의 게이트 입력용량을 방전하는 방식으로, MOSFET의 턴-온은  $Q_2$ 에 의해 이루어지고, 턴-오프는  $Q_3$ 을 턴-온하여 이루어진다. 그림 3(c)는 그림 (b)의 회로에 콘덴서 C를 추가해서 MOSFET의 턴-오프 시에 C의 역바이어스 전압을 게이트에 인가하는 방식이다. 이 역바이어스에 의해 스위치의 턴-오프 시간은 단축된다. 그림 3(d)는 펄스트랜스를 이용해서 절연시키고 정부의 펄스전압을 게이트에 인가하는 구동방식이다. 그림 3(e)는 턴-오프 시에 트랜지스터 Q를 온하여 입력용량을 방전하는 방식이다. 그림 3(a)~(e)는 회로정수가 3~15(A)급의 MOSFET에 적용되는 구동회로라 할 수 있다.

일반적으로 대용량 전력변환기에서는 스위칭 제어회로와 전력회로 사이에 전기적인 절연이 필요하다. 이에 대해 그림 3(f)는 포토커플러에 의해 절연되고 정부의 전원에 의해 구동되는 방식이며, 주로 대용량의 MOSFET에 사용된다.

### 3.2 대용량 게이트 구동회로

30~50(A)급의 대용량 MOSFET의 구동회로를 그림 4에

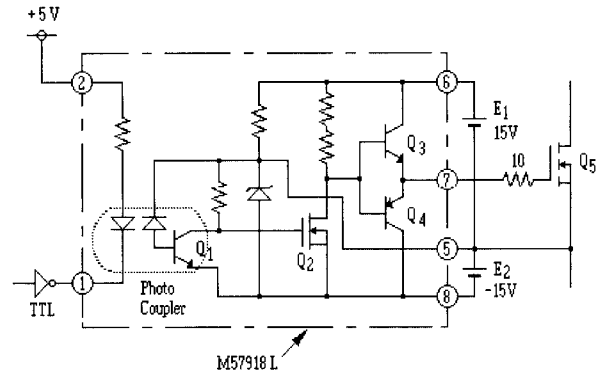


그림 4 대용량 게이트 구동회로

나타낸다. 포토커플러(PC)는 MOSFET의 고속성을 고려하여 동작지연 시간이 1[us] 이하의 고속 커플러를 사용하는 것이 바람직하다. 또한 MOSFET의 스위칭 시에 포토커플러의 1차와 2차사이에는 1000V/us 이상의  $dv/dt$ 가 인가되므로 내량이 큰 포토커플러를 사용해야 한다.

단자 ②와 ① 사이에 정의 전압이 인가되면 PC내의 빛에 의한 신호전달이 이루어져 PC 내의 트랜지스터  $Q_1$ 이 온 상태로 된다. 이것에 의해  $Q_2$ 의 게이트 전위가 낮아져  $Q_2$ 는 오프되고  $Q_3$ 가 온되어 최종단의 MOSFET  $Q_5$ 의 게이트에 정의 전압이 인가된다. 단자 ②, ① 간에 전압이 영이 되면  $Q_1$ 은 오프되고  $Q_2$ 는 온,  $Q_3$ 은 오프 그리고  $Q_4$ 는 온 되어 MOS의 게이트에는 부의 전압이 인가된다.

이상과 같이 본 회로는 MOSFET 게이트에 확실한 정·부 전압을 부여하고 속응성, 정밀성이 우수하여 대용량급에 이용된다. 그리고 하이브리드 IC(M57918L, M57919L 등)로 제품화되고 있다.

## 4. MOSFET의 보호 기술

### 4.1 과전압 보호

MOSFET에 인가되는 서어지(surge)전압에는 (1) 스위치나 소자 등의 외부 요인에 의해 발생하는 서어지 전압 (2) MOSFET 턴-오프 시에 그 자체에서 발생하는 서어지 전압 (3) MOSFET의 내부 다이오드의 도통상태에서 역전압인가 시 다이오드의 역회복 특성에 의해 발생하는 서어지 전압 등이 있다. 이러한 과전압에 대한 보호회로를 그림 5에 나타낸다. 그림 5(a)는 C, R에 의해 서어지 전압을 흡수하는 방식이며, 그림 5(b)는 이것에 다이오드 D를 추가해서 서어지를 크게 제어시키는 방식으로, 서어지 전압의 진동은 다이오드에 의해 억제되는 것이다. 그림 5(c)는 제너 다이오드에 의해 서어지 전압을 클램프시키는 방식이며, 그림 5(d), (e)는 적정

치 이상의 서어지 전압이 인가되면 MOSFET를 온 시키는 방식이다. 그림 5(f), (g)는 인버터회로에 이용되어, 정부의 모션간에 콘덴서를 접속해서 서어지 전압을 흡수하는 방식이다. 특히 그림 5(g)는 전원전압 이상의 서어지 전압을 흡수할 수 있어, 흡수회로의 손실을 크게 줄일 수가 있다. 그림 5(h)는 유도성 부하 L에 클램프 다이오드 D를 접속해서 부하에서 발생한 서어지 전압을 억제하는 방식이다. 그림 5(i)는 게이트 직렬저항  $R_G$ 을 접속하고, 게이트 역전압  $-V_{GS}$ 을 최적의 값으로 선택해서 턴-오프 시간을 지연시켜 서어지 전압의 발생을 억제하는 방식이다. 이들 방식에 있어, 과전압 제어회로 및 주회로의 배선은 가능한 짧게 하여 MOSFET의 전극에 가깝게 해야 한다.

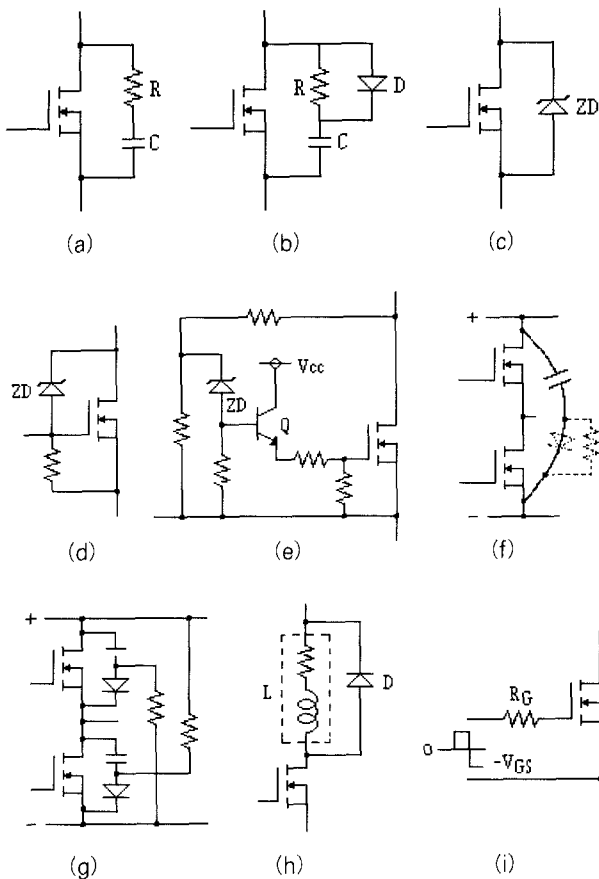


그림 5 서어지 전압 보호회로

4.2 환류 다이오드 보완 대책

모터 구동 등의 인버터 회로에는 MOSFET의 내장 다이오드가 환류다이오드(freewheeling diode)로 사용될 때가 있다. 이 경우 다이오드의 전류 전류(轉流) 시에 역전압에 의해 드레인·소스간에 정전압이 인가되는 모드가 있다. 이 전류

조건에 의해 전류감소를  $di/dt$  및 전압상승을  $dv/dt$ 가 크게 되어 MOSFET는 파괴될 수 있다. 그림 6에 내장 다이오드 전류 시의 파괴내량을 나타낸다. 이 파괴방지책으로는 그림 5(i)와 같이 게이트에 직렬저항을 접속시켜 다이오드 속도를 지연하여  $di/dt$  나  $dv/dt$ 를 억제시킬 수 있다. 또 그림 5(a), (b)와 같이 흡수기에 의한  $dv/dt$ 를 억제시키는 방법도 있다. 이상과 같은 방법들은 그림 6의 안전동작영역 내에서  $di/dt$  나  $dv/dt$ 를 억제시켜야 한다.

전류조건을 개선시키기 위한 방법으로 그림 7과 같이 MOSFET와 직렬로 역류방지용 다이오드를 접속하는 방법이 있다. 이 경우 내장 다이오드에는 전혀 전류가 흐르지 않으므로 앞서 서술한 파괴의 문제를 해결할 수 있다. 특히 고압 대용량의 용도에 유효하고, 또 이 구성을 이용한 30~

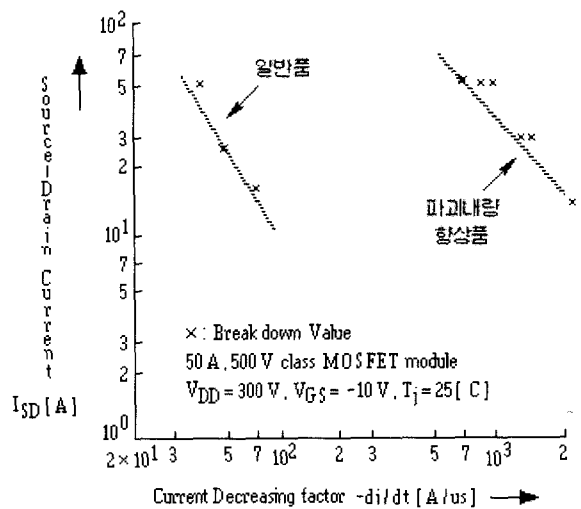


그림 6 내장 다이오드 전류시의 파괴내량

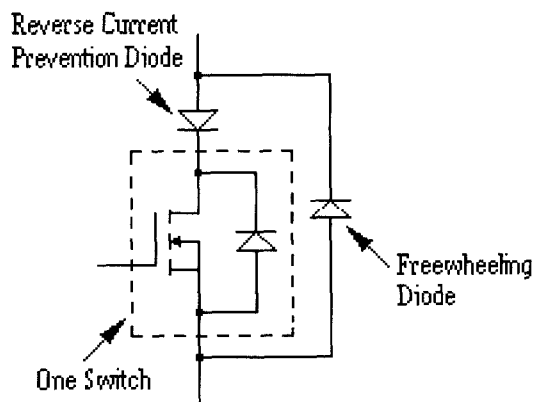


그림 7 전류시의 파괴내량 향상 토폴로지

100[A]의 MOSFET 모듈이 실용화 되고 있다. 이 역류방지용 다이오드는 쇼트키 장벽 다이오드 등의 고속 다이오드가 이용된다.

### 4.3 과전류 보호

MOSFET의 과전류에 의한 파괴 원인으로서는, (1) 부하 단락 등의 단락사고 (2) 과부하에 의한 과전류가 흐르는 경우이다. 그림 8에 MOSFET의 단락내량 시험결과를 보인다. 여기서 단락시의 파괴내량은 전원전압, 온도 그리고 게이트의 조건에 영향을 받음을 알 수 있다.

파괴를 막기 위한 방법으로, 단락전류를 검출한 후 파괴에 이르기 전 게이트 전압을 영 또는 부로 변환하여 단락전류를 차단하는 것이다. 과부하 전류에 대해서는 MOSFET에 인가된 전압·전류의 변화를 순방향 바이어스의 안전동작 영역 내에 들어오게 해서 과전류를 차단할 수 있다. 그러나 과전류 유입 시에 전압·전류 모두를 검출해서 안전동작 영역을 비

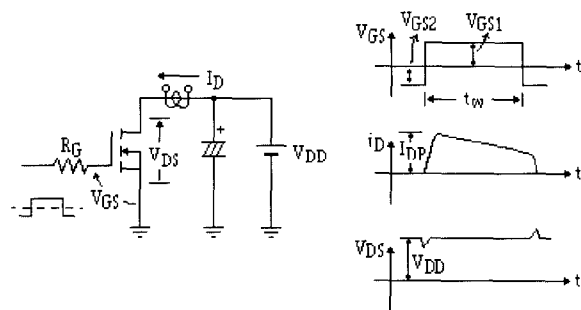
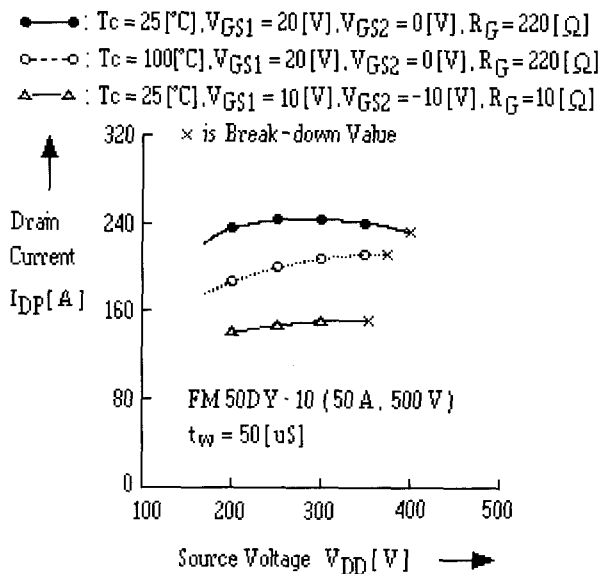


그림 8 단락내량과 그 시험법

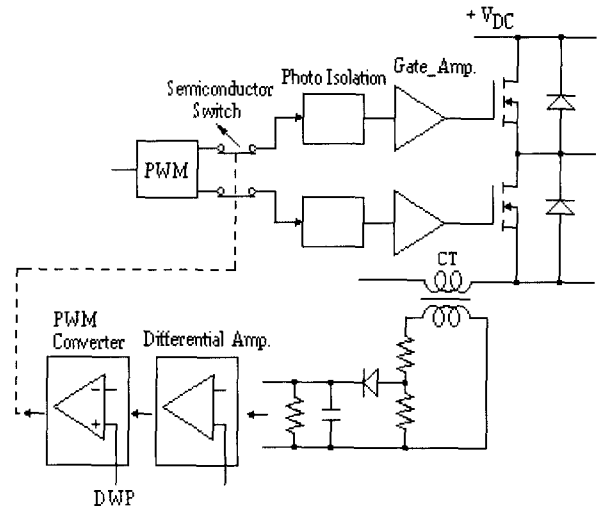


그림 9 과전류 보호회로

교하는 것은 용이하지 않다. 그러므로 일반적으로는 과전류만을 검출하여 게이트신호를 차단하거나 게이트 펄스폭을 좁게 해서 과전류를 감소시키는 방법이 있다. 그림 9는 과전류 보호회로를 나타내고 있으며, 변류기(CT)에 의해 과전류를 검출해서 MOSFET의 게이트 신호를 오프시켜 차단하는 방법이다. 여기서 CT에는 저항이나 홀소자를 사용하게 된다. 최근에는 센서 FET라 하여 전류검출 단자를 가지는 MOSFET도 제품화되고 있으며, 이 전류검출 단자를 사용하면 그림 9의 CT는 필요치 않게 되어 회로가 간소하게 되는 장점이 주어진다.

### 4.4 온도상승 보호

MOSFET의 실리콘 칩의 온도측정은 거의 불가능하다. 그래서 일반적으로 MOSFET의 케이스나 냉각판에 서미스터나 서모스태트를 장착해서 온도를 검출한다. 그래서 설정 온도 이상으로 되면 운전을 정지시키거나, 게이트 펄스를 짧게 하여 전류를 감소시켜 소자를 보호하는 방법이 있다.

## 5. MOSFET의 응용

### 5.1 MOSFET의 응용분야

MOSFET는 고내압화, 대전류화 그리고 온저항이나 단자간 커패시턴스의 저감 등에 의해 응용분야가 넓게 되었다. 또한 고성능 개발, 품종의 확충과 비용저감, 더우기 취급이 용이한 모듈의 출현 등에 의해 전력용 MOSFET는 바이폴라 트랜지스터를 대신해서 많은 분야에 사용되고 있다.

전력용 MOSFET의 정격전압, 전류 그리고 응용분야를 그림 10에 보인다. 이들 분야는 MOSFET의 고속스위칭 성능,

저구동 전력, 저손실(정격전압이 낮은 소자의 경우) 등의 장점을 잘 살려, 응용장치의 고성능화, 소형화 그리고 저손실화를 달성하였다.

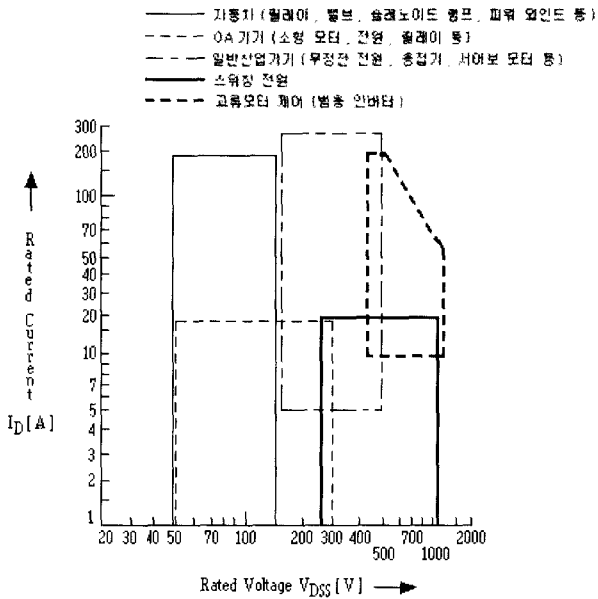


그림 10 응용분야

### 5.2 스위칭 전원장치

기존의 스위칭 전원장치에는 바이폴라 트랜지스터가 이용되어 50~100kHz 정도의 주파수로 전력변환이 이루어졌다. MOSFET의 출현에 의해 100~500kHz의 스위칭이 가능하게 되어 전원장치를 한층 더 소형화, 경량화 그리고 고효율화로 만들 수 있다. 그림 11에는 스위칭 전원회로를 보인다. 주회로의 스위칭 소자로 MOSFET가 이용되고 이것의 제어용으로는 M51977 IC가 사용된다.

### 5.3 모터 제어장치

교류 모터제어용 인버터장치에 전력용 MOSFET를 이용하면 다음과 같은 장점이 주어진다. (1) 스위칭 주파수를 가칭 주파수 이상(15~20kHz 이상)으로 하여 무소음 인버터가 가능 (2) 고주파 펄스폭 변조방식에 의해 왜율이 적은 정현파 전류를 모터에 공급할 수 있어 인버터의 역률이나 효율 향상이 가능 (3) 구동회로의 소형화가 가능 등이 있다. 그림 12에는 중·대용량의 모터제어용 인버터 회로를 보인다.

## 5. 맺음말

MOSFET는 전압제어용 소자이므로 구동전력이 적고, 따라서 구동부가 간단하고, 소형으로 된다. 턴-온저항의 온도특성이 정이므로, 전류집중이 일어나기 어렵고, 이로 인하여 2

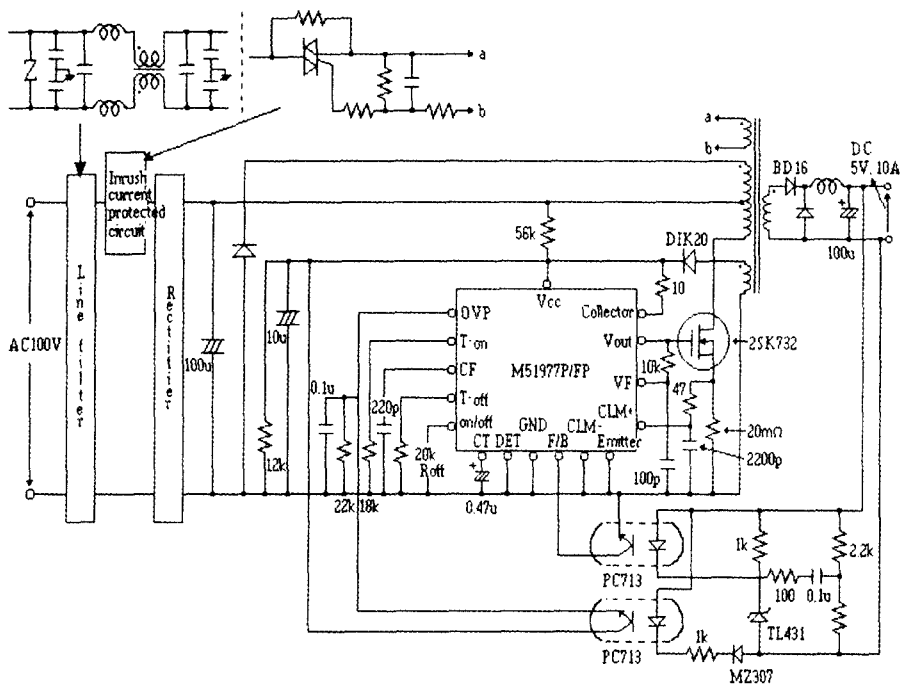


그림 11 스위칭 전원회로

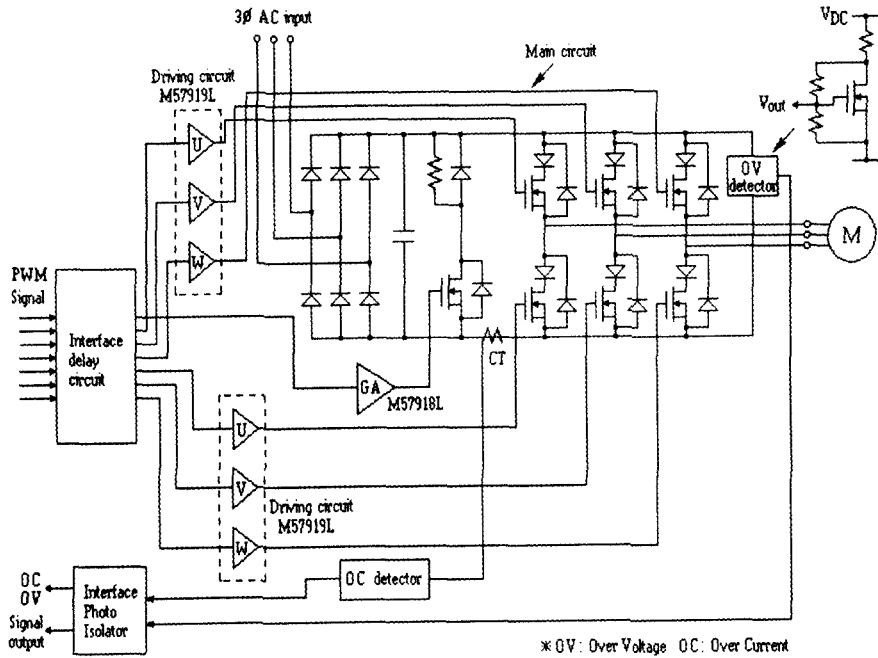


그림 12 중·대용량 교류모터 제어용 인버터 회로

차 항복현상이 없으므로 안전동작 영역이 넓다. 또한 스위칭 속도는 극히 빨라서 수십 nsec에서 수백 nsec 정도이며, 스위칭 주파수도 수백 kHz에서 수 MHz에 이른다. 반면에 전력 용량은 그다지 큰편은 아니지만, 전압용량은 최대 1000V 내외, 전류용량은 최대 100A 내외가 된다. 따라서 MOSFET는 정밀 서보 드라이브나 컴퓨터나 정보기기에 장착되는 SMPS (switched mode power supply) 등과 같이 소형의 전력을 다루고 고주파 스위칭을 요구하는 응용분야에 주로 사용된다. ■

[4] M. H. Rashid, "Power Electronics: Circuits, Devices, and Application", Englewood Cliffs, N. J.: Prentice-Hall, Inc., 1988.  
 [5] 正田英介, 岩本英雄, "最新パワーデバイス活用讀本", 오ーム社, 1988.  
 [6] J. Vithayathil, "Power Electronics: Principle and Application", McGraw-Hill Book Co. 1994.

참고 문헌

[1] E. S. Oxner, "Power FETs and Their Applications", Englewood Cliffs, N. J.: Prentice-Hall, Inc., 1982  
 [2] B. R. Pelly, "Power MOSFETs—a status review", International Power Electronics Conference, pp. 10~32, 1983.  
 [3] G. Chryssis, "High-frequency switching power supplies", McGraw-Hill Book Co. 1984.

〈저자 소개〉



곽동길 (郭東杰)

1964년 11월 11일생. 1990년 2월 경남대학교 전기공학과 졸업(학사). 1993년 8월 경남대학교 대학원 졸업(석사). 1997년 2월 동 대학원 졸업(박사). 1997년 2월 거창기능대학 교수. 1998년 2월~현재 동해대학교 전기공학과 교수.