



Stefano M (Ste75)

# CALCOLO SWITCHING LOSS MOSFET CON CARICO RESISTIVO

2 October 2011

## Sommario

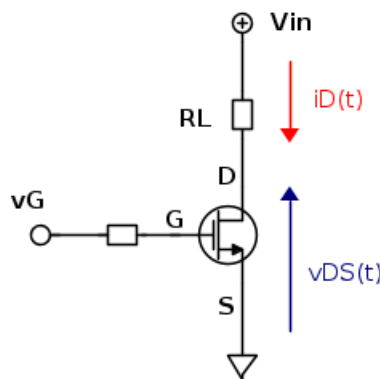
Nel seguente documento sono descritte le **perdite per switching** (switching losses) nel caso di un mosfet che pilota un carico resistivo alimentato a sua volta da una tensione continua.

Verrà trattata in prima analisi la formula da utilizzare per il calcolo della potenza dissipata, sia nel caso di accensione che spegnimento.

In un secondo momento verrà trattata nel dettaglio la fase di accensione con i relativi tempi.

## Calcolo della “formula” per la potenza dissipata

Consideriamo il seguente schema:



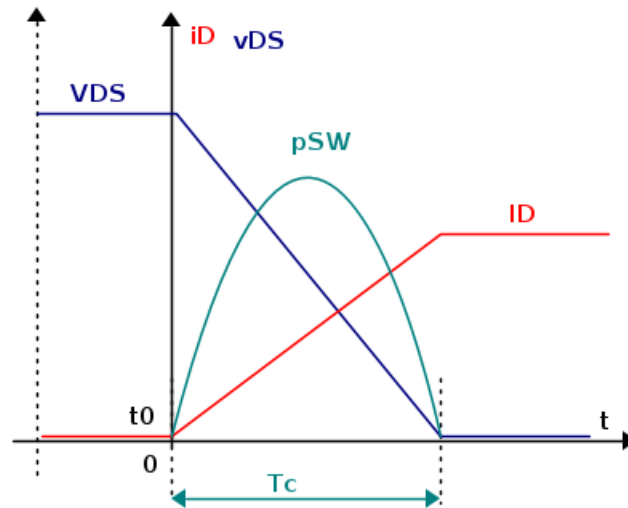
Appena  $v_G$  supera la  $V_{GS}$  di soglia inizia a formarsi il canale e scorre quindi corrente  $i_D$ .

Di conseguenza ESSENDO **CARICO RESISTIVO**, la  $v_{DS}$  scende proporzionalmente alla corrente.

Tutto il processo, e quindi anche le tempistiche di accensione le descrivo più avanti (compreso **effetto Miller**).

Ora voglio capire quanto vale la potenza dissipata dal **MOS** durante l'accensione e lo spegnimento.

Consideriamo la transizione fatta così:



Il prodotto  $v_{DS} \cdot i_D = p_{SW}$  (è una parabola in quanto ho il prodotto di due termini di primo grado) mi dà la potenza istantanea. Se integro da 0 a  $T_C$  ottengo l'energia dissipata nella transizione di accensione con carico resistivo.

$$E_{on} = \int_0^{T_C} v_{DS}(t) \cdot i_D(t) dt$$

Le due curve, assumendo con istante  $t=0$  quello in cui inizia la transizione, cioè  $t_0 = 0$ , le posso scrivere come:

- $i_D(t) = \frac{I_D}{T_C} t$
- $v_{DS}(t) = -\frac{V_{DS}}{T_C} t + V_{DS}$

Ovviamente  $V_{DS} = V_{in} = \text{cost}$  (il MOS è aperto) e  $T_C$  è un tempo che per ora non so ancora quanto vale ma che considero costante. Inoltre è (MOS chiuso)

$$I_D = \frac{V_{in}}{R_L}$$

### Calcolo energia dissipata

$$E_{on} = \int_0^{T_C} \left( -\frac{V_{DS}}{T_C} t + V_{DS} \right) \cdot \left( \frac{I_D}{T_C} t \right) dt$$

$$E_{on} = \int_0^{T_C} \left( -\frac{V_{DS}}{T_C^2} I_D \cdot t^2 + \frac{V_{DS} \cdot I_D}{T_C} \cdot t \right) dt$$

$$E_{on} = \left[ -\frac{V_{DS}}{T_C^2} I_D \cdot \frac{t^3}{3} + \frac{V_{DS} \cdot I_D}{T_C} \frac{t^2}{2} \right]_0^{T_C}$$

$$E_{on} = -\frac{V_{DS}}{T_C^2} I_D \cdot \frac{T_C^3}{3} + \frac{V_{DS} \cdot I_D}{T_C} \frac{T_C^2}{2}$$

$$E_{on} = \frac{1}{6} V_{DS} \cdot I_D \cdot T_C$$

A questo punto la potenza dissipata dal mosfet è l'energia per la frequenza di switching  $f_{SW} = \frac{1}{T_{SW}}$ .

Considerando poi che c'è anche l'energia dissipata durante lo spegnimento (processo inverso coneventualmente un  $T_C$  diverso nello spegnimento, quindi indicando con  $T_{ON}$  e  $T_{OFF}$  i due tempi di transizione), possiamo scrivere in conclusione:

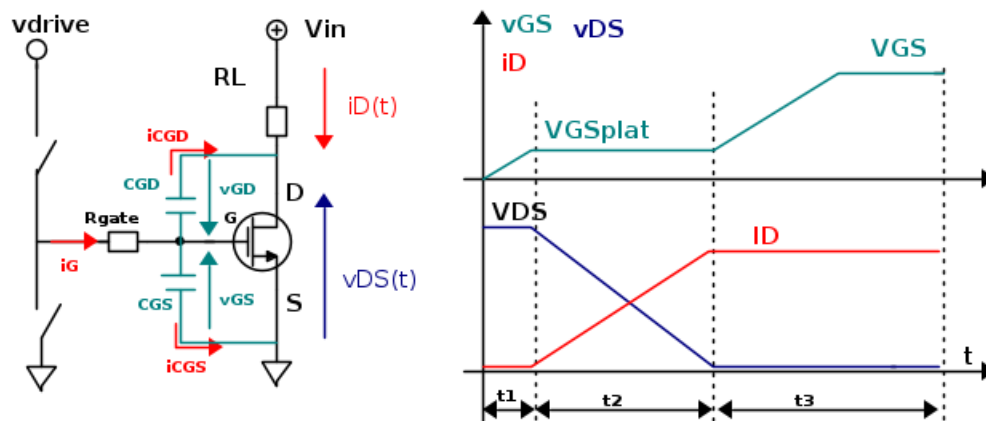
$$P_{SW_{ON}} = \frac{1}{6} V_{DS} \cdot I_D \cdot T_{ON} \cdot f_{SW}$$

$$P_{SW_{OFF}} = \frac{1}{6} V_{DS} \cdot I_D \cdot T_{OFF} \cdot f_{SW}$$

Ricordo, come già scritto prima, che  $V_{DS}$  è pari a  $V_{in}$ .

A questo punto è necessario capire quanto valgono i tempi di  $T_{ON}$  e  $T_{OFF}$ .

### Studio del ciclo di accensione mos (con carico resistivo)



## intervallo t1

La  $v_{drive}$  tramite  $R_{gate}$  carica la capacità  $C_{GS}$  alla tensione  $v_{GS}$ .

Questa salirebbe secondo un esponenziale, ma per semplicità considero una carica lineare (vedi tratto verde su t1). Fino a quando la  $v_{GS}$  non supera la  $V_{GSth}$  la corrente di drain  $i_D$  non aumenta, e di conseguenza, essendo carico resistivo, la  $v_{DS}$  non scende. Arrivati all'inizio di  $t_2$ , inizia a formarsi il canale e quindi  $i_D$  aumenta e la  $v_{DS}$  scende. In questa fase, la capacità  $C_{GD}$  è carica ed ha ai suoi capi una tensione pari a  $V_{in} - v_{GS}$  che, poco alla volta, è un valore che diminuisce, cioè si scarica leggermente

*Esempio:*  $V_{in} = 24\text{ V}$ ,  $v_{GS}$  parte da 0 e va a 5 V. La  $v_{CGD}$  quindi va da 24 a 20 V.... praticamente quasi costante. La corrente che scorre dentro di essa che è:

$$i_{CGD} = C_{GD} \cdot \frac{dv_{CGD}}{dt}$$

Considerando una bassa  $\frac{dv_{CGD}}{dt}$  posso considerarla nulla.

Quindi nella fase 1 tutta la corrente che passa nella  $R_{gate}$  va a caricare  $C_{GS}$ , quindi  $i_G \cong i_{CGS}$ .

## intervallo t2

Quando  $v_{GS}$  supera la  $V_{GSth}$ , la  $v_{DS}$  scende. Qui inizia

### *l'effetto Miller*

Vediamo di spiegarlo. Tornando al discorso fatto prima sulla  $C_{GD}$  adesso la cosa è un po' diversa perché succede che la  $v_{DS}$  inizia a scendere e la  $v_{CGD}$  diminuisce più rapidamente.

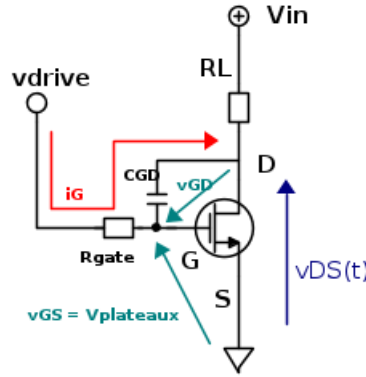
Più alto è il valore di  $v_D$  (cioè più alto è  $V_{in}$ ) maggiore escursione ha la  $v_{CGD}$ .

In questo caso la  $\frac{dv_{CGD}}{dt}$  è grande, quindi posso dire che tutta la corrente che arriva dalla resistenza di gate, se ne va nella  $C_{GD}$  e NON PIU' nella  $C_{GS}$ . Quindi ora  $i_G \cong i_{CGD}$

Ecco che allora che la  $v_{GS}$  rimane circa costante e forma il Plateaux.

La tensione di plateaux non rimane costante come nel caso di carico induttivo perché qui la corrente di drain sta crescendo e deve anche quindi crescere la tensione  $V_{GS}$ . Dato però che il guadagno del MOS, pur non essendo lineare, è comunque grande,

la tensione di plateau rimane praticamente costante anche con carico resistivo, variando tipicamente di un paio di volt al massimo, a partire dalla tensione di soglia. Comunque vediamo di stimare  $t_2$ . Lo schema è il seguente:



La corrente che scorre in  $R_{gate}$  è pari a  $i_G = \frac{v_{drive} - v_{GS}}{R_{gate}}$ . Questa corrente abbiamo detto va tutta in  $C_{GD}$  facendo diminuire la tensione ai suoi capi (praticamente lo scarica).

A causa della variazione di  $v_{DS}$ , c'è una corrente nella  $C_{GD}$  che non può che essere quella che viene dal gate tramite il driver. La  $v_{DS}$  dunque scende, la  $v_{GS}$  è praticamente fissa a  $V_{plateaux}$ , e la  $v_{GD}$  pure diminuisce. La zona di plateau finisce quando la  $v_{DS} = 0$ ; a questo punto cessa l'effetto Miller.

Il tempo  $t_2$  (che poi è quello in cui avviene la dissipazione di potenza) si trova considerando questa:

$$i_{C_{GD}} = C_{GD} \cdot \frac{dv_{C_{GD}}}{dt}$$

con

$$i_{C_{GD}} = \frac{v_{drive} - V_{plateaux}}{R_{gate}}$$

Quindi calcolo  $t_2$

$$t_2 = \frac{C_{RSS(rale)} \cdot V_{in}}{I_{C_{GD}}}$$

Nel caso dello spegnimento, le curve sono simili ma con il percorso inverso.

A parole, quello che succede è che la  $v_{GS}$  da  $v_{drive}$  pian piano scende. Fino a quando non è arrivato al valore di Miller, la  $v_{DS}$  rimane a 0 volt (o poco più, dipende da  $R_{DS(on)}$ ) e la  $i_D$  è sempre il valore massimo.

Quando poi il MOS inizia a “riaprirsi” la  $v_{DS}$  inizia a risalire. A questo punto la  $C_{GD}$  ancora si becca ai suoi capi un  $\frac{dv_{C_{GD}}}{dt}$  che moltiplicata per  $C_{GD}$  “impone una corrente”. Esso si sta caricando, e questa corrente sarà al massimo quella che scorre verso massa dal driver, limitata dalla  $R_{gateOFF}$ .

Quindi ancora NON ci sarà più una variazione di  $v_{GS}$  che rimane a  $V_{plateaux}$  e quindi la corrente sarà  $\frac{V_{plateaux}}{R_{gateOFF}}$ .

Poi il tempo in cui avverrà questo fenomeno sarà sempre:

$$t_2 = \frac{C_{RSS( reale )} \cdot V_{in}}{I_{C_{GD}}}$$

## Riassumendo tutto

### Fase ON

$$T_{ON} = \frac{C_{RSS( reale )} \cdot V_{in}}{I_{C_{GD}}}$$

con

$$i_{C_{GD}} = \frac{v_{drive} - V_{plateaux}}{R_{gateON}}$$

e mettendo come  $V_{plateaux}$  una stima di quanto possa essere  $V_{Miller}$  supponendo che intervenga subito dopo la  $V_{GS}$

### Fase OFF

$$T_{OFF} = \frac{C_{RSS( reale )} \cdot V_{in}}{I_{C_{GD}}}$$

con

$$I_{C_{GD}OFF} = \frac{V_{plateaux}}{R_{gateOFF}}$$

e con

$$C_{RSS( reale )} \cong 2 \cdot C_{RSS( specificata )} \cdot \sqrt{\frac{V_{DS( specificata )}}{V_{DS( off )}}}$$

Estratto da "<http://www.electroyou.it/mediawiki/index.php?title=UsersPages:Ste75:calcolo-switching-loss-mosfet-con-carico-resistivo>"