

Il caso dei MOSFET in serie

Premessa

Nei circuiti logici è frequente il caso in cui diversi MOSFET dello stesso tipo si trovano con il gate allo stesso potenziale e con i canali in serie.

In questi casi farebbe comodo poter considerare i dispositivi come un unico MOSFET equivalente.

Nel caso in cui i MOSFET hanno la stessa tensione di soglia V_{Tn} , si può dimostrare che la cosa è possibile e che il valore del coefficiente equivalente da usare nell'espressione della corrente k_{eq} è pari all'inverso della somma degli inversi dei k_n di quello dei singoli transistori¹.

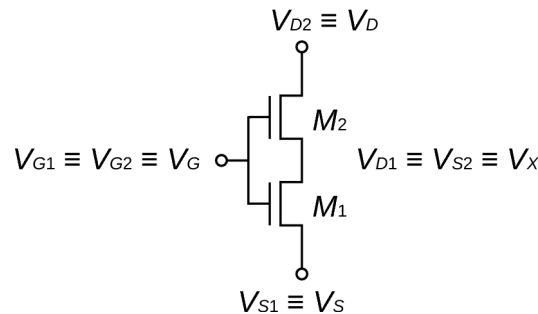


Figura 1: Circuito composto da due nMOSFET con la stessa tensione di gate e canali in serie.

Per dimostrare l'affermazione, consideriamo due MOSFET a canale n nelle condizioni descritte, chiarite ulteriormente dallo schema in Figura 1.

Una volta determinate le caratteristiche del MOSFET equivalente, è immediato estendere iterativamente la procedura a un numero arbitrario di MOSFET e ugualmente, seguendo la stessa traccia in modo duale, dimostrare la proprietà trovata anche per i MOSFET a canale p .

Due nMOSFET in serie: interdizione

Riprendendo la Figura 1, si abbiano due nMOSFET in serie, con la stessa tensione di soglia V_{Tn} . Per costruzione, secondo quanto stabilito per il singolo MOSFET, si ha

$$V_D > V_X > V_S$$

Esaminiamo le possibili zone di funzionamento della serie in funzione delle tensioni applicate ai terminali. Nel caso in cui

$$V_{GS} < V_{Tn}$$

entrambi i MOSFET sono sicuramente interdetti ed è

$$I_{DS} = 0$$

Zona triodo

Se ora invece consideriamo le due condizioni

$$V_{GS} > V_{Tn} \quad \text{e} \quad V_{GD} > V_{Tn}$$

allora sicuramente entrambi i MOSFET sono in zona triodo e le due correnti, uguali tra loro, sono determinate dalle relazioni per la zona triodo

¹ Operativamente, si tratta della stessa espressione per il calcolo della resistenza equivalente di più resistori in parallelo.

$$I_{DS} = \frac{k_{n1}}{2} (V_X - V_S)(2V_G - V_S - V_X - 2V_{Tn})$$

$$I_{DS} = \frac{k_{n2}}{2} (V_D - V_X)(2V_G - V_X - V_D - 2V_{Tn})$$

Con semplici passaggi è possibile determinare a partire dalle due formulazioni di I_{DS} , due espressioni che sommate membro a membro permettono di eliminare la dipendenza dalla V_X . Si ha

$$\begin{aligned} 2I_{DS} \left(\frac{1}{k_{n1}} + \frac{1}{k_{n2}} \right) &= (V_X - V_S)(2V_G - V_S - V_X - 2V_{Tn}) + (V_D - V_X)(2V_G - V_X - V_D - 2V_{Tn}) = \\ &= -V_X^2 + V_X^2 + V_X(2V_G - V_S - 2V_{Tn} + V_S - 2V_G + V_D + 2V_{Tn} - V_D) + \\ &+ V_S(-2V_G + V_S + 2V_{Tn}) + V_D(2V_G - V_D - 2V_{Tn}) = \\ &= V_S^2 - V_D^2 - 2V_G(V_S - V_D) + 2V_{Tn}(V_S - V_D) = \\ &= V_{DS}(2V_G - V_S - V_D - 2V_{Tn}) \end{aligned}$$

In conclusione abbiamo ottenuto che la corrente che scorre nella serie è

$$I_{DS} = \frac{k_{eq}}{2} V_{DS}(V_{GS} + V_{GD} - 2V_{Tn})$$

ove, come si voleva dimostrare, è

$$k_{eq} = \frac{1}{\frac{1}{k_{n1}} + \frac{1}{k_{n2}}}$$

Zona di saturazione

Assumiamo ora infine il caso

$$V_{GS} > V_{Tn} \quad \text{e} \quad V_{GD} < V_{Tn}$$

allora sicuramente il MOSFET M_2 è in saturazione, mentre il MOSFET M_1 è in zona triodo ($V_{GX} > V_{Tn}$). Avendo determinato le zone di funzionamento, anche in questo caso possiamo scrivere la corrente I_{DS} in funzione delle tensioni in gioco

$$I_{DS} = \frac{k_{n1}}{2} (V_X - V_S)(2V_G - V_S - V_X - 2V_{Tn})$$

$$I_{DS} = \frac{k_{n2}}{2} (V_G - V_X - V_{Tn})^2$$

La strategia risolutiva è la medesima del caso precedente. Usando le nuove relazioni si ottiene

$$\begin{aligned} 2I_{DS} \left(\frac{1}{k_{n1}} + \frac{1}{k_{n2}} \right) &= (V_X - V_S)(2V_G - V_S - V_X - 2V_{Tn}) + (V_G - V_X - V_{Tn})^2 = \\ &= -V_X^2 + V_X^2 + V_X(2V_G - V_S - 2V_{Tn} + V_S - 2V_G + 2V_{Tn}) + \\ &+ V_S(-2V_G + V_S + 2V_{Tn}) + (V_G - V_{Tn})^2 = \\ &= V_S^2 - 2V_G V_S + 2V_S V_{Tn} + V_G^2 + V_{Tn}^2 - 2V_G V_{Tn} = \\ &= (V_G - V_S - V_{Tn})^2 \end{aligned}$$

Anche in questo caso abbiamo ottenuto che la corrente che scorre nella serie è data dalla stessa espressione che si otterrebbe da un singolo MOSFET equivalente

$$I_{DS} = \frac{k_{eq}}{2} (V_{GS} - V_{Tn})^2$$

In definitiva, affiancando al risultato dimostrato quello più ovvio relativo a MOSFET in parallelo (equivalenti a un unico transistor con il coefficiente pari alla somma dei k_n dei singoli transistori) si ha un potente strumento per determinare la relazione corrente-tensione di circuiti con MOSFET dello stesso tipo e con la medesima soglia.