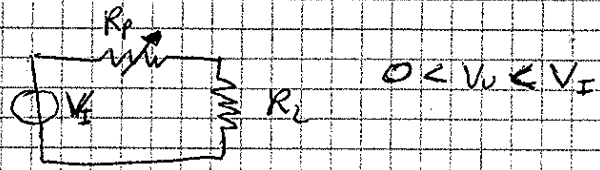


CONVERTITORI DC/DC

Esistono migliaia di modi per fare conversione non efficiente, ma 1 solo per farlo efficiente.

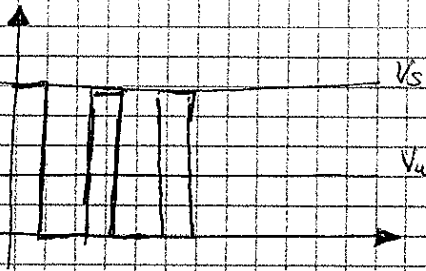
Se alimentazione VSI



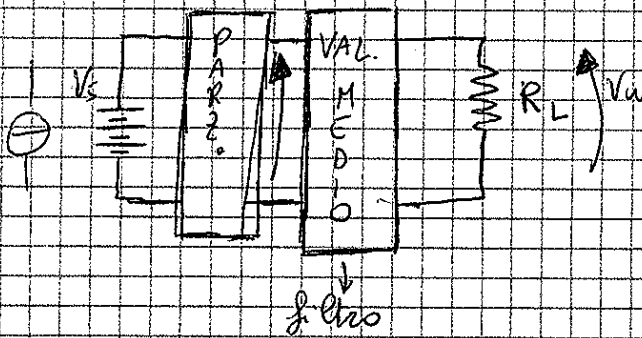
Bassissima efficienza

Esiste un modo completamente diverso. È l'elettronica che richiede la maggior parte ~~dei~~ ^{dei} convertitori DC/DC (anche i motori DC/DC)

Per convertire DC/DC bisogna parzializzare e filtrare.



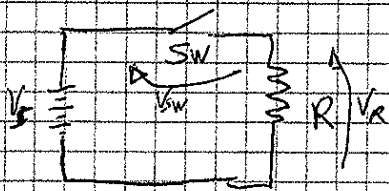
Si può parzializzare V_s in modo che il valore medio in uscita sia V_u .



Equivalenti in corrente ed in tensione. Cambia solo il parzializzatore

Come si può realizzare idealmente e realmente?

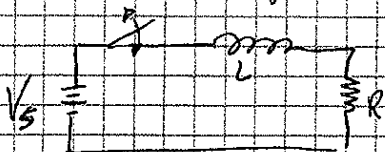
Per parzializzare abbiamo bisogno di SWITCH



$$V_s = V_R + V_{sw}$$

V_R non è continua

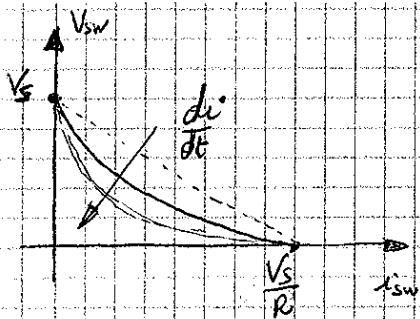
Non è soddisfacente anche perché ci sarà sicuramente un induttanza.



$$V_s = V_{sw} + V_R + L \frac{di}{dt}$$

Analizziamo la relazione $V_{sw} = V_s - V_R$ per capire le possibili soluzioni

$$V_{sw} = V_s - V_R - L \frac{di}{dt} = V_s - R_i - L \frac{di}{dt}$$



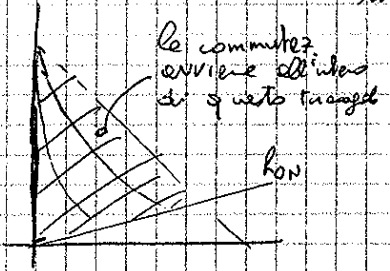
... comportamento se SWITCH si comporta come resistivo.

Quando lo switch passa da OFF a ON, la corrente cresce $\Rightarrow \frac{di}{dt} > 0$
 A regime $i = \frac{V_s}{R}$. Al crescere di $\frac{di}{dt}$ la curva si sposta sempre più.

COMPONENTE REALE

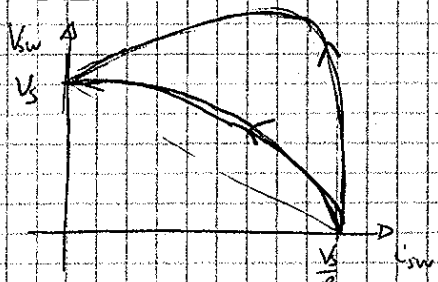
He di condizioni < conduzione interdizione

Se transistor
 R_{ON}
 R_{OFF}



Quanto tempo ci vuole per passare da R_{OFF} a R_{ON}

TURN OFF

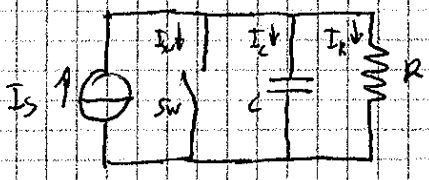


$$V_{sw} = V_s - R_i - L \frac{di}{dt}, \quad \frac{di}{dt} < 0$$

Non posso aprire istantaneamente altrimenti facciamo arco.

Si può paralizzare, ma non in questo modo. Così si rischia di rompere il componente.

Osservando il CSI



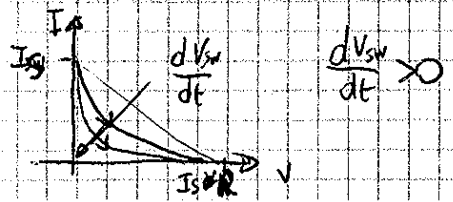
$$I_s = I_{sw} + I_c + I_r$$

$$I_s = i_{sw} + C \frac{dv}{dt} + i_r =$$

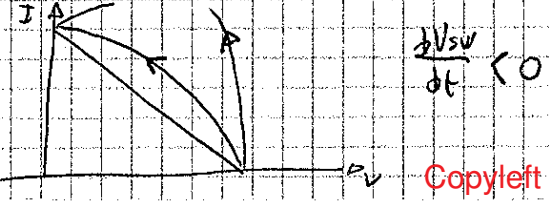
$$= i_{sw} + C \frac{dv}{dt} + \frac{V}{R}$$

$$i_{sw} = I_s - \frac{V_{sw}}{R} - C \frac{dV_{sw}}{dt}$$

TURN OFF

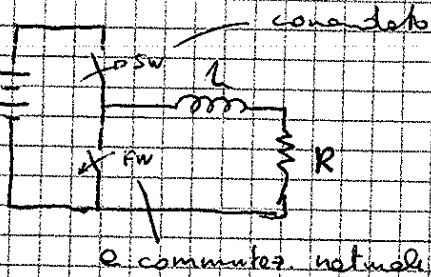
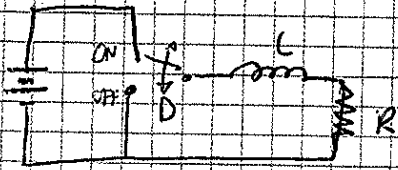


TURN ON

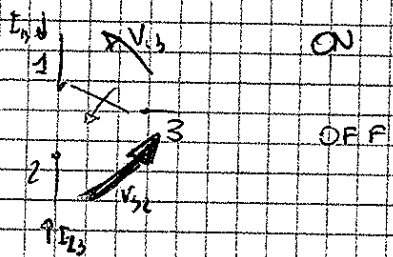


Con un solo interruttore non si va da nessuna parte.
 La soluzione è il deviatore.

Fisicamente non esiste un deviatore perfetto



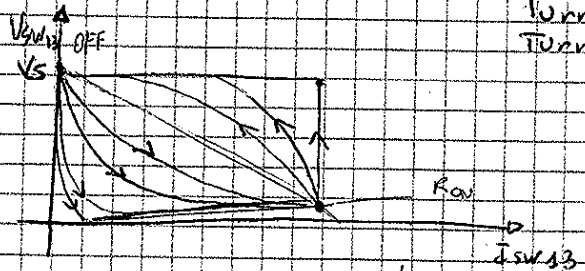
Perché DEVIATORE?



ON } $R_{13} = R_{ON} \rightarrow 0$
 $R_{12} = R_{OFF} \rightarrow \infty$
 OFF } $R_{13} = R_{OFF} \rightarrow \infty$
 $R_{12} = R_{ON} \rightarrow 0$

$V_S = V_{SW} + V_R + V_L$ ON

$0 = V_{SW} + V_R + V_L$ OFF



$V_S = V_{SW1,3} + V_{SW3,2}$

Se OFF $V_{SW3,2} \approx 0$

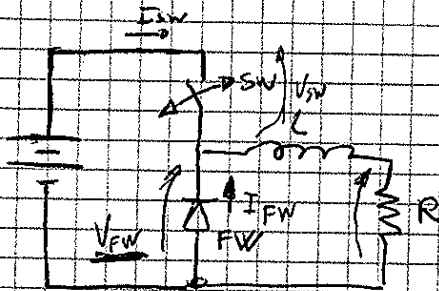
$V_{SW1,3} \approx V_S$

$V_S = V_{SW1,3} + V_R + L \frac{dI_{SW}}{dt}$

$V_{SW1,3} = V_S - V_R - L \frac{dI_{SW}}{dt}$

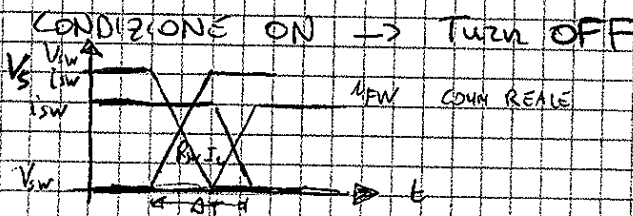
Il deviatore fa delle curve molto belle e consente di rimanere all'interno del rettangolo. Ma il deviatore non è reale.

Circuito simile



CONVERTITORE BUCK, STEP DOWN,
"CHOPPER" 1Q, ABBASSATORE

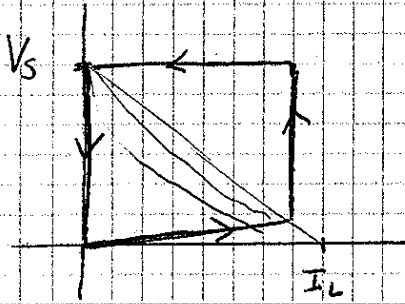
È il più semplice convertitore diretto (senza isolamento I/O)



(potrebbe funzionare anche con un diodo reale)
 $V_{FW} + V_{SW} = V_S \Rightarrow W_{FW} = V_S - V_{SW}$

Primo fase commutazione tensione e poi commuto la corrente!

Il percorso è:



Nota: V_{smax} e I_{Lmax} si conoscono il componente da scegliere.

È facile calcolare quanto si dissipa

$$\Delta T = \frac{V_s \cdot I_L}{2} = E_{OFF} \quad \text{Energie persa in ogni commutazione al Turn off.}$$

CADUTE di CONDUZIONE

$$P_{con,ON} = R_{ON} \cdot I_L \cdot \frac{T_{ON}}{T_{TOT}} \quad \text{perdite in conduzione in ON}$$

$$P_{con,OFF} \approx 0, \quad R_{OFF} \rightarrow \infty$$

Perdite per commutazione $P_{com} = P_{com,OFF} + P_{com,ON}$

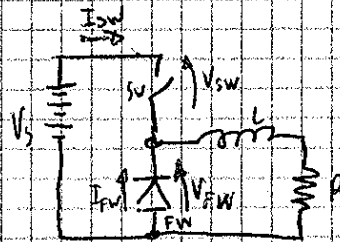
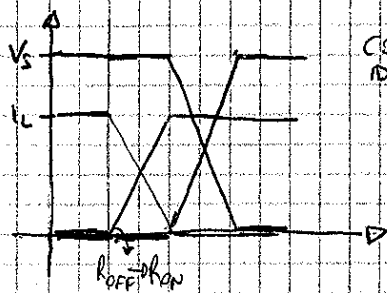
Anche il diodo perde in conduzione.

$$P_{con,SW} = V_F \cdot I_L \cdot \frac{T_{OFF}}{T_{TOT}}$$

$$P_{con,SW} \approx 0$$

$$P_{COMM,D} = P_{com,OFF} + P_{com,ON} = 0$$

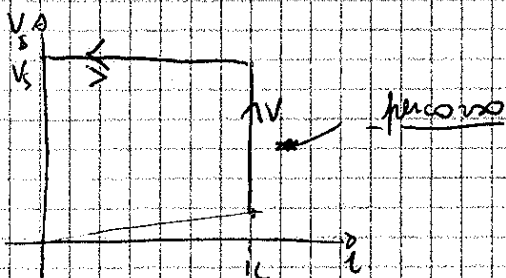
TURN ON



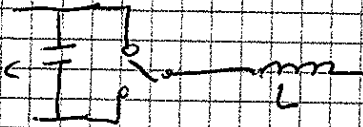
$$V_{sw} + V_{fw} = V_s$$

$$I_L = I_{sw} + I_{fw}$$

il percorso della switch è di nuovo il percorso di prima, ma fatto alla rovescia

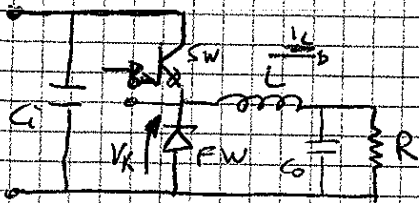


CELLA CANNONICA di COMMUTAZIONE



ci deve essere L perché garantisca che I_L resti costante e ci deve essere C che garantisca che V_o sia costante.

Il buck è unidirezionale ed unipolare. $V_o > 0$ inoltre $V_o < V_i$



Quanto dura la commutazione? Noi volemmo sapere avere un'onda il più quadrata possibile. Ci più interessante che $\frac{\Delta I_{com}}{I_s}$. Ovviamente ΔI_{com} deve essere trascurabile, cioè $\frac{\Delta I_{com}}{I_s} < 1\%$.

Se lavoriamo con onde quadre il switch è in condizione di ON o di OFF. Se ΔI_{com} è trascurabile e se $I_L > 0$ (non nullo). Allora anche FW è sempre in OFF o in ON.

Facciamo l'analisi a regime cioè quando l'onda quadra è periodica e regolare. Si ha cioè questo cond. iniz. = cond. final. = op. L, Co, Ci.

$$f_s = \frac{1}{T_s} \quad D = \frac{T_{on}}{T_s} \text{ duty cycle}$$



1) V_i è supposto cost. $\Rightarrow V_i = \text{cost}$ (dato)

2) DC/DC quindi $V_o = \text{cost}$ (desiderato)
 $\hookrightarrow V_o = \text{cost}$

Dobbiamo quindi considerare solo L

$$|\Delta I_{L, ON}| = |\Delta I_{L, OFF}|$$

$$V_L(t) = L \frac{di(t)}{dt} \quad \begin{matrix} \textcircled{1} \\ \textcircled{2} \end{matrix}$$

① ON: $V_L(t) = V_i - V_o = \text{cost}$
 $L \frac{di}{dt} = \text{cost} = \frac{V_i - V_o}{L}$

$$\Delta I_{L, ON} = \frac{V_i - V_o}{L} T_{ON}$$

② OFF: $V_L(t) = \frac{V_o}{L} - V_o = \text{cost}$

$$L \frac{di}{dt} = \text{cost} = -\frac{V_o}{L}$$

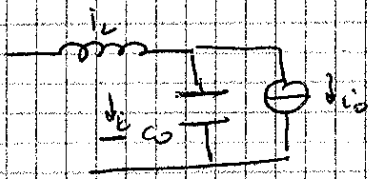
$$\Delta I_{L, OFF} = -\frac{V_o}{L} T_{OFF}$$

$$\frac{V_i - V_o}{L} T_{ON} = \frac{V_o}{L} T_{OFF}$$

$$V_i \cdot T_{ON} = V_o (T_{ON} + T_{OFF}) \Rightarrow \frac{V_o}{V_i} = D$$

$$V_0 = D V_i \rightarrow \begin{cases} V_i = \text{cost} \\ V_0 = \text{cost} \\ I_L \text{ non pulcata} \end{cases}$$

Considerazioni: - C_o - Se vogliamo un DC/DC significa che $I_R = \text{cost}$, $V_R = \text{cost}$. Vogliamo che l'uscita sia costante.



Scegliere L significa scegliere I_{eff} nel condensatore. C_o scegliere anche C_o capacitori.

$$I_{CPK} = \frac{\Delta I_{om}}{2} = \frac{V_i - V_0}{2L} T_{on} = \frac{V_i - V_0}{2L} \cdot D \cdot T_s$$

Max (I_{CPK}) per D = 0,5

$$C = Q \Delta V = \int i_C dt \Delta V = \frac{V_i}{8L} \cdot \frac{1}{4} T_s^2 \Delta V \quad \text{se } D = 0,5$$

$$I_{PK_{max}} = \frac{V_0}{4L} T_s = \frac{V_i}{8L} T_s$$

$$Q = I_{PK_{max}} \cdot \frac{T_s}{2} \cdot \frac{1}{2} = \frac{V_0}{8L} \cdot \frac{1}{4} T_s^2$$

V_i e ΔV sono dati del problema

L e T_s sono salbe.

Non si hanno problemi delle perdite su controllo

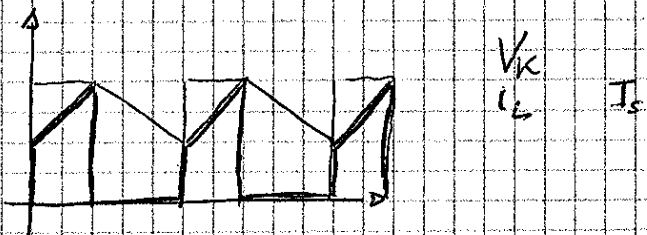
- C_i - Perché se V_i = cost. Noi vorremmo che anche i_C = cost. perché vogliamo fare un DC/DC

Noi vogliamo che V_i I_i = V_o I_o se m_v = 1

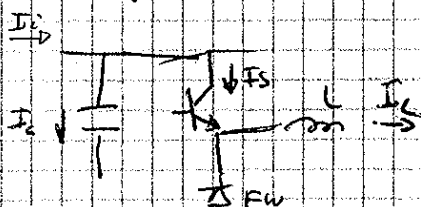
Se V_{out} = D V_{in} → C_i = D I_{out}

Come è fatta la corrente di ingresso?

I_i senza C_i I_i = I_s



lo scopo di C_i è beccarsi la oscillazione.

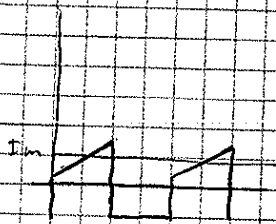


Deve essere alta l'impedenza del generatore. Il modo più facile per aumentare l'impedenza è mettere un induttore.



$D = 0,5$

L_m molto grande



$i_{ci, rms} \approx i_{med, c}$
 $i_{prc} = \frac{V_i}{L} \cdot \frac{\pi D}{4} \cdot \frac{1}{f}$

Sollecitazione dei componenti:

$V_{m, max}$

$FW = V_i$

$I_{FW, max} = I_{o, max} (1 - D)$

$I_{FW, prc} = I_{prc} = I_{m, max} + i_{prc}$

SWITCH: c'è problema del REVERS RECOVERY. Fenomeno di

switching delle zone di carica spaziale. In tutti i diodi a giunzione quando la corrente si annulla non finisce la conduzione. Quando $i = 0$ si ha



$I_F = 0$, ma il diodo non è ancora chiuso. Per diventare

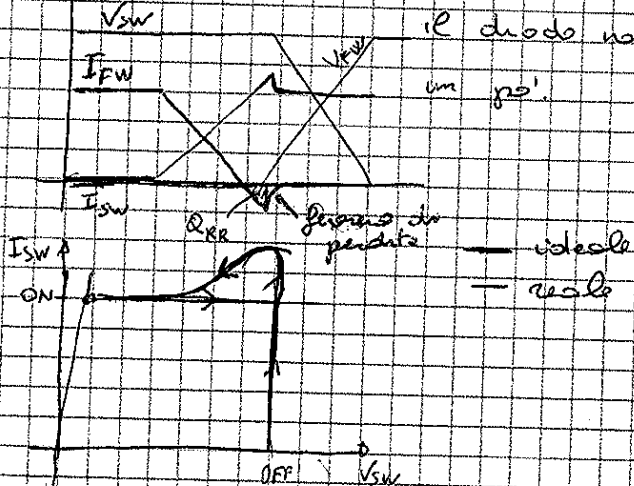
ciruito si deve svuotare la zona di carica spaziale cioè



Se

guardiamo l'evoluzione delle correnti nel tempo durante un commutazione

il diodo non si ferma a 0, ma continua per un po'.

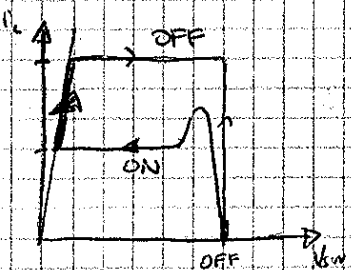


Tanto più è veloce la commutazione tanto più è alta la corrente inversa massima. Ci si ferma a ~50% di quella commutata.

$I_{sw, max} = 50\% I_{c, max}$

Un diodo lento a commutare perde tanto.

Uno dei vantaggi del Buck è che quando si chiude lo switch i_c è minimo. Quindi per capire quanto $I_{min} (1/5) < I_{max}$



Quindi:

$$V_{DVR,max} \Rightarrow V_i$$

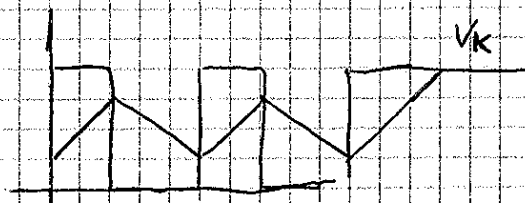
$$I_{L,m} = I_{i,m} = I_{o,m} \cdot D$$

$$I_{pk} = I_L + I_{RR,pk} \text{ dipende da DIODO FW}$$

Ricepi to C.ano:

- diretto
- unipolar
- unidirezionale
- $V_o = D V_i$ se L non pulsata
- $I_{L,RMS} = \frac{V_i}{8} T_s \frac{1}{3}$
- $G = Q \Delta V$
- $I_{L,RMS} = \frac{I_o}{2}$ W.C

L : $\frac{di_L}{dt} \Big|_{max} \rightarrow \frac{di_L}{dt} \Big|_{max}$



Se voglio fare variazioni di corrente velocemente serve che L sia piccola.

Se invece si vuole fare un eliminatore, ma si vuole variazare lento allora L è grande.

È meglio avere piccoli L e piccoli T_s .

f_{s} : 1 kHz \div 1 MHz
(100 W) (100 W)

T_{comm} : dipende da I_L e V_o $50 ns \div \mu s$ se $V_{sw} < 50 nS$ allora $V_o < 100k$

Perdite

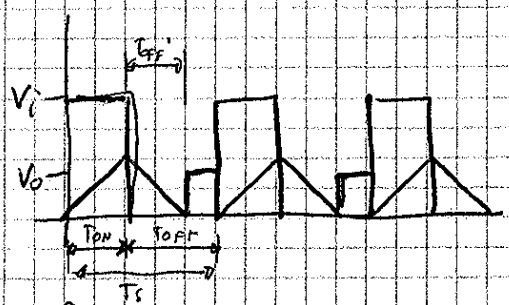
$P_{sw} = P_{cond} + P_{comm}$

$P_{FW} = P_{cond}$

$P_L = R_L I_L^2 + P_{fe} + P_{cu,N}$

$P_c = P_{ci} + P_{co} = E_{RR} \frac{I_{RMS}^2}{f_{s}} + E_{RR} I_{RMS}^2 + E_{RR} I_{RMS}^2$

BUCK in CORRENTE PULSATA (o DISCONTINUA)



In realtà V_k non è fatto così quando switch è chiuso è giusto. Apr switch si divide diodo. Questo

$i_L = 0$ $V_k = V_o$

Quindi non è valido $V_o = V_i D$. Il vantaggio di questo sistema (DCM) è che è sempre a regime.

$$(V_i - V_o) T_{ON} = V_o T_{OFF}$$

$$I_{max} = \frac{V_i - V_o}{L} T_{ON}$$

$$I_{o,m} = \frac{I_{max}}{2} \cdot \frac{(T_{ON} + T_{OFF})}{T_S}$$

$$I_{o,m} = \frac{V_i - V_o}{2L} T_{ON} \frac{T_{ON} + T_{OFF}}{T_S} \Rightarrow V_i T_{ON} = V_o (T_{ON} + T_{OFF})$$

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{T_{ON}}{T_{ON} + T_{OFF}}$$

$$T_{ON} + T_{OFF} = \frac{I_{o,m}}{V_i - V_o} (2L T_S)$$

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{T_{ON}^2 (V_i - V_o)}{I_{o,m} (2L T_S)}$$

$$\Rightarrow \boxed{\frac{V_o}{V_i} = \frac{D^2}{D^2 + \frac{2L I_{o,m}}{V_i}}}$$

f_s : freq. switch.

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{T_{ON}}{T_S} \left(\frac{V_i - V_o}{I_{o,m} 2L} \right) D = D^2 \frac{V_i - V_o}{2L I_{o,m} T_S} = \dots$$

$$I_N = \frac{V_i}{2f_s L} \approx \frac{4V_i I_{max}}{4} = \frac{V_i}{2} \frac{1}{f_s L} \frac{1}{L}$$

TECNICHE DI CONTROLLO

Se voglio $I_{o,m}$ la cosa più semplice è commutare a $I_{max} = 2 I_{o,m}$ e a $I_L = 0$. Se I_o viene, viene anche la frequenza di commutazione (f_c)

Tecniche modulazione $\left\{ \begin{array}{l} f \text{ cost.} \rightarrow \Delta I \text{ variabile} \\ f \text{ variabile} \rightarrow \Delta I \text{ fissa.} \end{array} \right.$

Se f è fissa viene $V_i - V_o$

Se f è variabile $V_i - V_o$ rimane costante.

80% dei casi f è costante perché i disturbi sono della frequenza f in su. Inoltre se f è costante è facile fare il controllo in quel tempo.

$$\frac{V_o}{V_i} = D^2 \frac{V_i (1 - \frac{V_o}{V_i})}{2L I_{o,m} f_s} \quad \frac{V_o}{V_i} (1 + \frac{V_i - V_o}{2L I_{o,m} f_s}) = \frac{D^2 V_i}{2L I_{o,m} f_s}$$

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{D^2 K}{1 + D^2 K} = \frac{D^2}{D^2 + \frac{2L I_{o,m} f_s}{V_i}} \quad K$$

COMPONENTI SWITCH

MOSFET : (P)
POWER MOSFET, N



V_s : 20V ... 600V - 1200V

I : 1A ... 600A

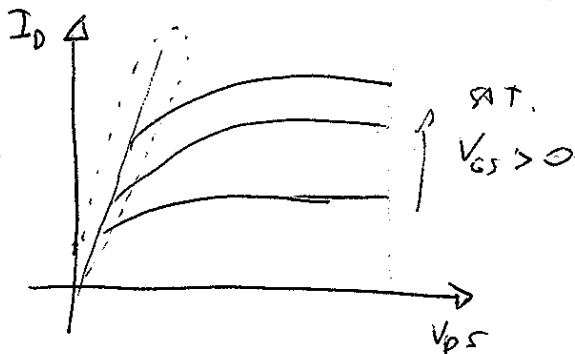
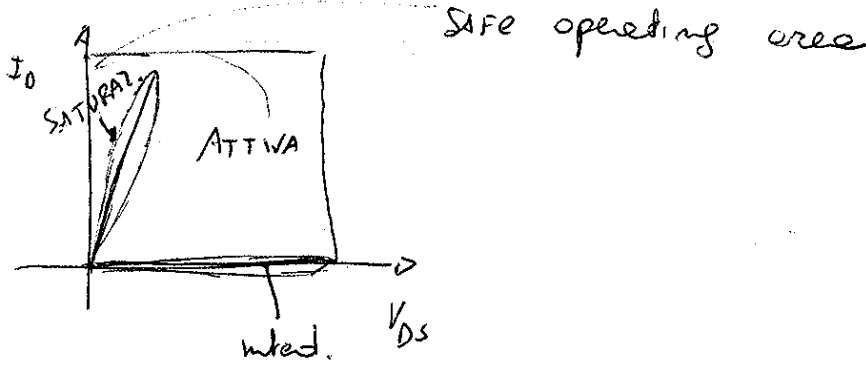
Tecnologie Silicio

1) Body-diode:



Tra D ed S si ha un diodo e non si può fare altrimenti.

2) Bidirezionali D-S

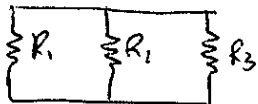
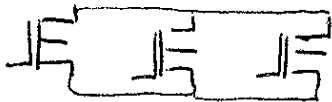


$$V_{GS} \sim 10V$$

$$V_{DS} = R_{DS(on)} I_{DS}$$

$$R_{DS(on)} \sim m\Omega$$

PARALLELABILE!



Quando sono chiusi c'è come mettere in // delle resistenze.

Le resistenze non sono tutte uguali.

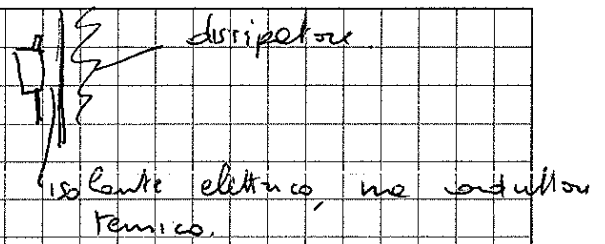
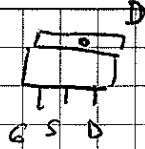
Quindi per corrente diverse. A quelle su cui passa più corrente si sceglie di più.

e esse faranno corrente uguale in tutto. Il sistema fa retroazione negativa.

MOSFET SiC

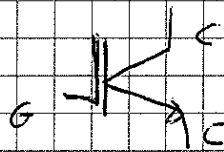
- Ron sono più basse
- Body-diode buono
- Tensioni elevate.
- Temperature di giunzione elevate.

CASE - TO 220



MODULO

IGBT
K A I R
T B A
G O L A
U C I S T
T O R
R



V: $\overbrace{150-200-350-600-1200}^{RMS}$
 $6500 - 3500 - 1500 - 1700$
 I: 1 - 800 | - 2500
 + non

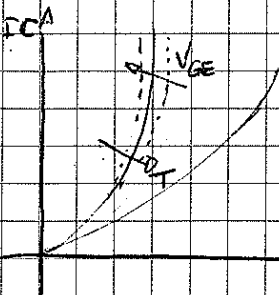
Campo applicazione in Potenza

tecnologia: non hanno body-diode e sono unidirezionali ($I_c > 0$)

o lenti o veloci
 10^4 kHz 10^5 kHz

cadute di ON $V_{ce, sat}:$ $1,5V$ $\approx 2 V_{ce, sat}$ $3V$

caratteristiche costruttive e rettificazione



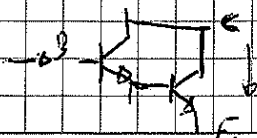
$V_{GE} \approx 10-20V$

Più si riscalda e più costante la tensione

L'IGBT non è parallelo (come per V_{ce} come delle sincronismo).

$$P_{cond} = V_s I_n + R_{d,eff} I_{eff}^2$$

DARINGTON

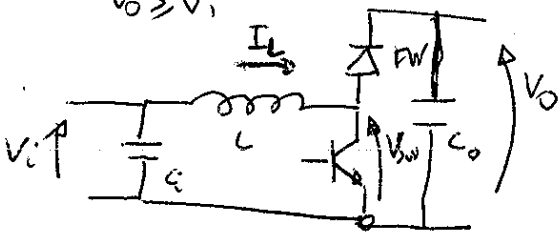


IGBT $\rightarrow V_{ce} > 0$
 DARINGTON \rightarrow

MOSFET \rightarrow Body diode

- BOOST
- CONVERTITORE ELEVATORE
- STEP-UP

$V_0 \geq V_i$

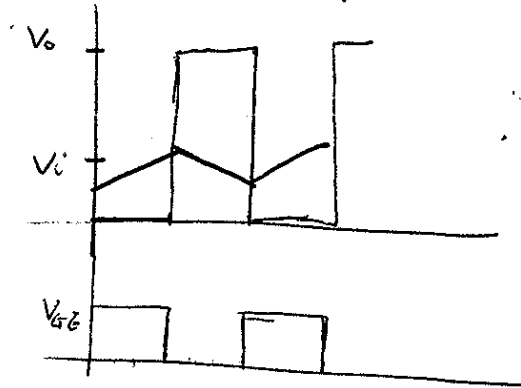


$V_i = \text{cost}$

$V_0 = \text{cost (stendere)}$

V_0 non può essere minore di V_i

I_L non pulsata



Analisi a regime

$|\Delta i_{L ON}| = |\Delta i_{L OFF}|$

$\frac{V_i}{L} \cdot T_{ON} = \frac{V_0 - V_i}{L} T_{OFF}$

$V_i T_{ON} = (V_0 - V_i) T_{OFF}$

$\frac{V_i T_{ON}}{T_{OFF}}$

$V_i (T_s) = V_0 T_{OFF}$

$\frac{V_i}{V_0} = \frac{-T_{OFF} + T_s}{T_s} = -D + 1 \Rightarrow$

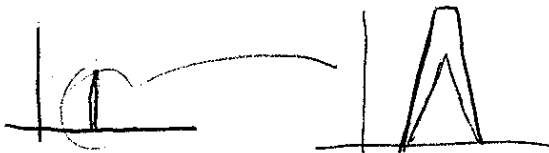
$\Rightarrow \frac{V_0}{V_i} = (-D+1)^{-1} = \frac{1}{-D+1}$

$\frac{V_0}{V_i} \Big|_{\text{max}} \approx 10$

ed è più tanto!!

infatti per avere $\frac{V_0}{V_i} \approx 10 \Rightarrow D = 0,9$

limite zero i tempi di commutazione

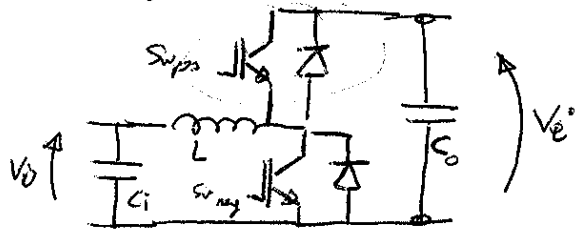


Definisco il duty cycle del FW

" D_{FW} " = $1 - D_{sw}$

$\frac{V_0}{V_i} = \frac{1}{D_{FW}} \Rightarrow \frac{V_i}{V_0} = D_{FW}$

Come si fa un convertitore BOOST bidirezionale?



BUCK BOOST bidirezionale ma non bipolare

GAMBA D'INVERTER (inverter leg)

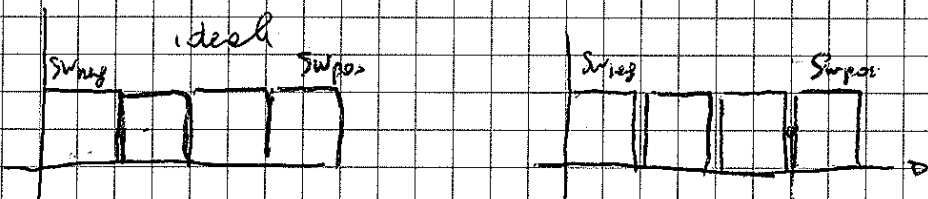
N.B. ci sono 2 celle canoniche unidirezionali:

Se chiudo i due SWITCH faccio un corto. I 2 switch non devono mai essere chiusi insieme (neanche in commutazione).

Generalmente SWpos e SWneg non conducono insieme. Utile il tempo Franco (o morto).

$$\frac{V_0}{V_i} = D_{SW_{pos}} \quad D_{SW_{neg}} = 1 - D_{SW_{pos}}$$

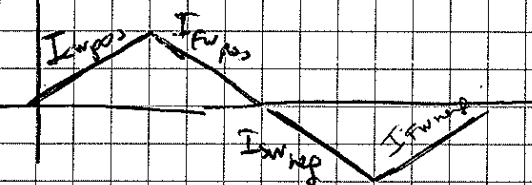
Il tempo morto si questo resto spenti entrambi:



tempo morto \Rightarrow tempo commutazione.

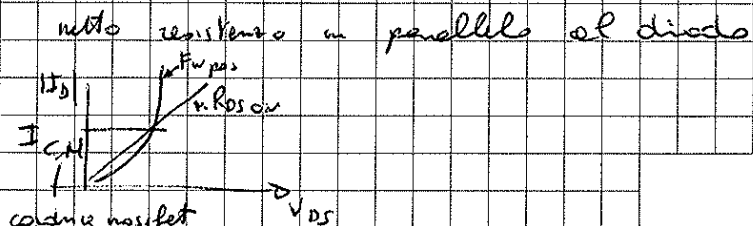
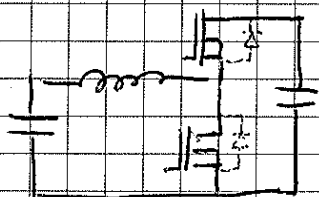
Tempo morto è uno dei limit. reali nella commutazione bidirezionale.

Non essendo mai in disarcamento



$$\frac{V_0}{V_i} = D_{SW_{pos}} \text{ vale sempre.}$$

I MOSFET vanno particolarmente bene



è probato e si sapeva I_{CM} perché il body-diode fa schifo.

Questo convertitore si chiama rettificatore sincrono e ne abbiamo con $V < 100V$.

Retta siamo qualche: struttura più vari fare a modo, ne uno il mosfet in cad. questo ~~conduttore~~ conduttore il diodo.