

Sistemi Elettronici per Automazione e Robotica



5 DC/DC converters

Prof. Sergio Saponara

DII, Università di Pisa

sergio.saponara@unipi.it

Agenda

- Principi convertitori DC/DC switching
- Buck converter (step-down)

Analisi in frequenza e nel tempo

- Half Bridge e Full Bridge
- Boost converter (step-up)
- Buck-Boost converter (invertente)
- MOS bridge anche per AC/DC

Principi convertitori DC-DC switching

- I regolatori switching sono costituiti da due blocchi:
 - Un “convertitore di potenza”, che trasforma la tensione e la corrente in ingresso in una tensione e una corrente d’uscita di livello opportuno per alimentare correttamente il carico
 - Un anello di controllo che legge la tensione d’uscita (ed eventualmente altre grandezze) e pilota il convertitore per ottenere la tensione d’uscita voluta compensando le variazioni del carico e della tensione d’ingresso

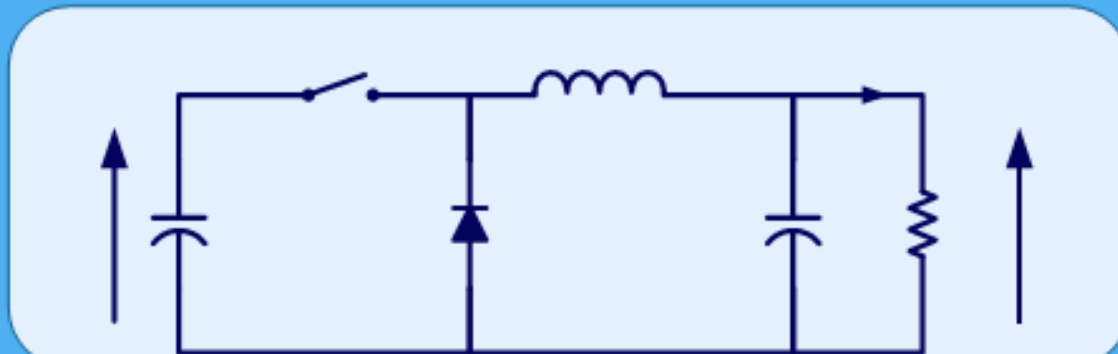
Convertitori DC-DC switching

- Il convertitore ha elevata efficienza in quanto gli elementi attivi interni sono utilizzati come interruttori e non in linearità
- La legge che lega l'uscita all'ingresso del convertitore non è lineare e per di più varia a seconda delle condizioni di carico, quindi l'anello di controllo è difficile da progettare e da rendere stabile in tutte le condizioni d'utilizzo
- Nel seguito si studieranno i convertitori, mentre si darà solo uno schema di principio del controllore

Buck-converter

- Analisi modo continuo
- Limiti modo continuo
- Convertitore buck: non linearità

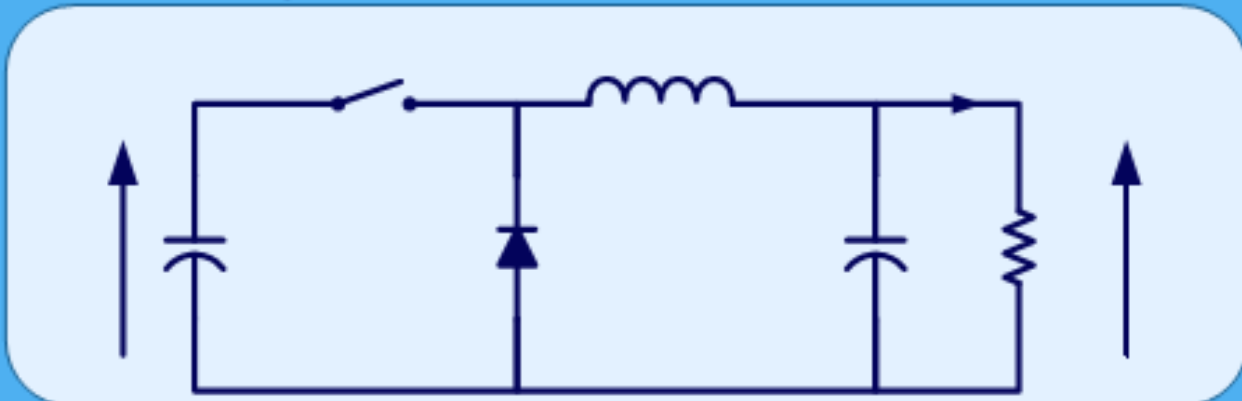
- La caratteristica peculiare del convertitore buck è che la tensione d'uscita può solo essere più bassa di quella d'ingresso, da cui il nome di step-down
- R_L rappresenta il carico del convertitore, C_u e C_i filtrano le correnti d'uscita e d'ingresso, il convertitore vero e proprio è costituito da S , D ed L



Buck-converter

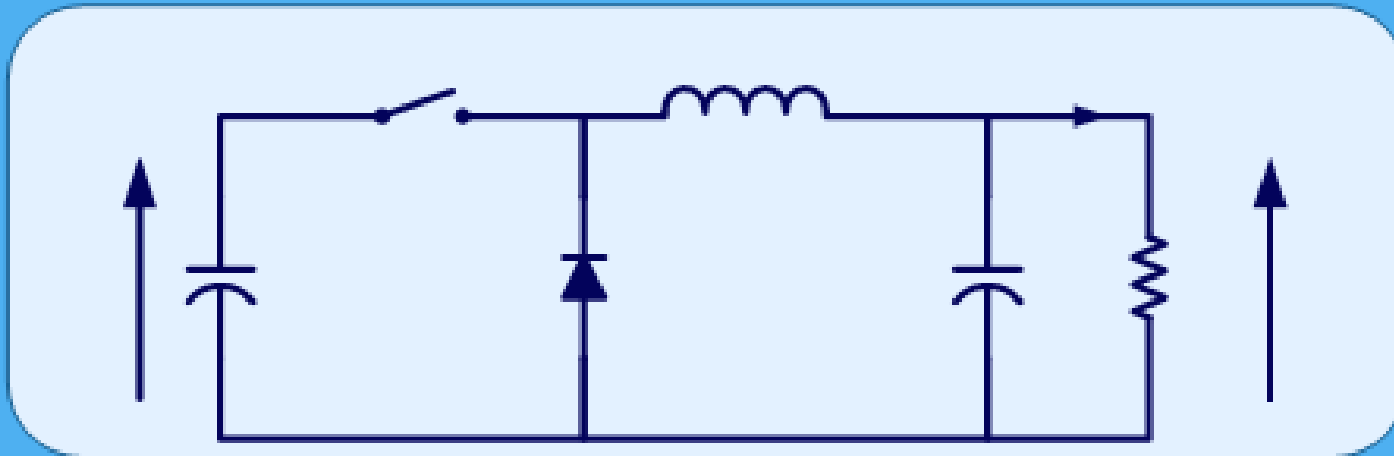
► Ipotesi iniziali:

- S pilotato in modo periodico, da onda quadra, ON per tempo T_1 , OFF per T_2 .
- Studio a regime: tutti i cicli sono uguali (in particolare la corrente nell'induttanza all'inizio di T_1 è uguale a corrente all'inizio del ciclo successivo)
- V_I e V_U costanti in un ciclo



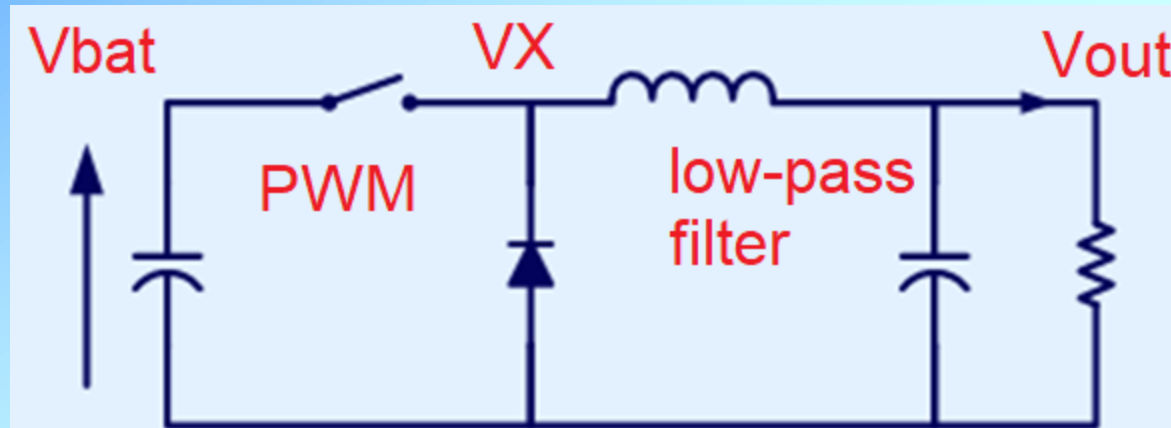
Buck-converter

- Il comportamento del convertitore è diverso a seconda che la corrente nell'induttanza sia sempre diversa da 0: modo continuo (Continuous Current Mode) oppure vada a 0 per una parte di periodo (Discontinuous Current Mode)
- Si studierà prima la modalità CCM



Buck-converter

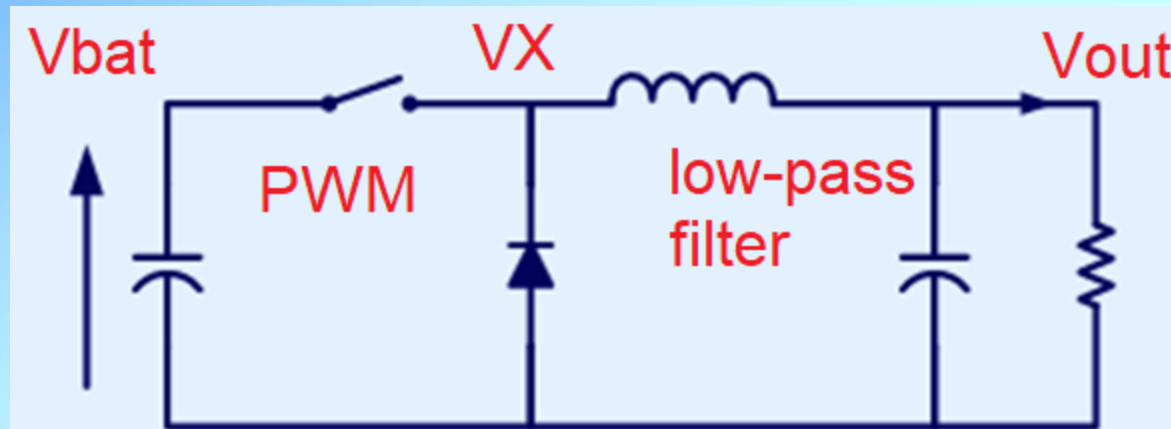
analisi in dominio frequenziale



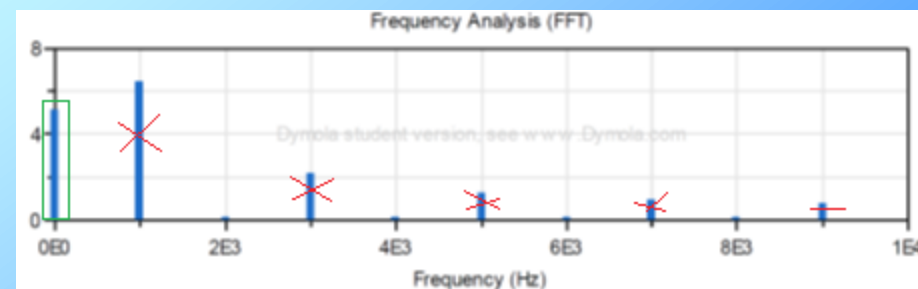
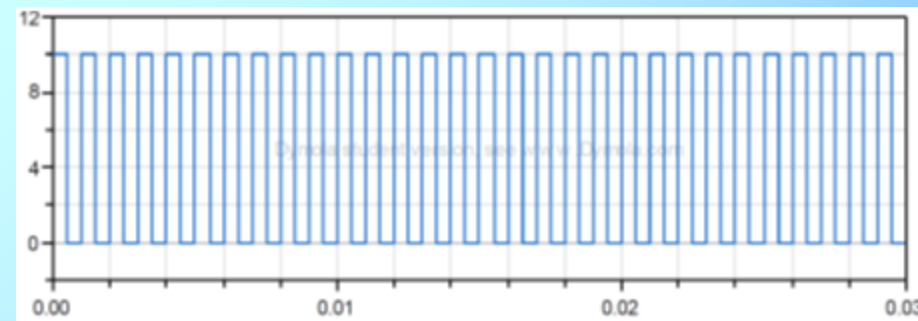
Tensione V_X varia tra 0 e V_{bat} con
andamento PWM (duty cycle D , F_{sw}) + Filtro
LC low-pass per prelevare la DC
($f_t = 1/2 \cdot \pi \cdot \sqrt{LC} \ll F_{sw}$)

Buck-converter

analisi in dominio frequenziale



Se $V_{bat}=10V$
PWM ($D=0.5$, $F_{sw}=1$ kHz)
Filtro LC low-pass ($L=10$ mH, $C=10$ mF $\rightarrow F_t=15.9$ Hz $\ll 1$ kHz)
 $V_{out}=D \cdot V_{bat}=5$ V



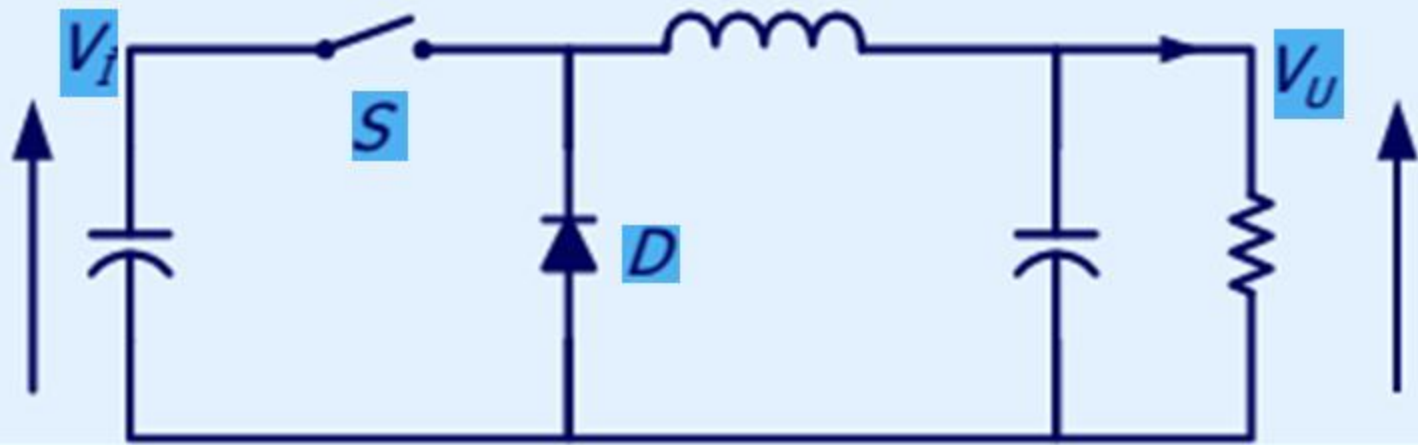
Buck-converter analisi nel tempo

- La chiave per ricavare la transcaratteristica dei convertitori switching consiste sempre nell'analisi di corrente e tensione nell'induttanza.
- Caratteristiche principali del componente ideale:
 - La corrente nell'induttanza non ha discontinuità
 - La relazione tra tensione e corrente in un induttore è la seguente

$$V_L = L \frac{di_L}{dt} \quad di_L = \frac{1}{L} V_L dt \quad i_L(t) = i_L(0) + \frac{1}{L} \int_0^t V_L(t) dt$$

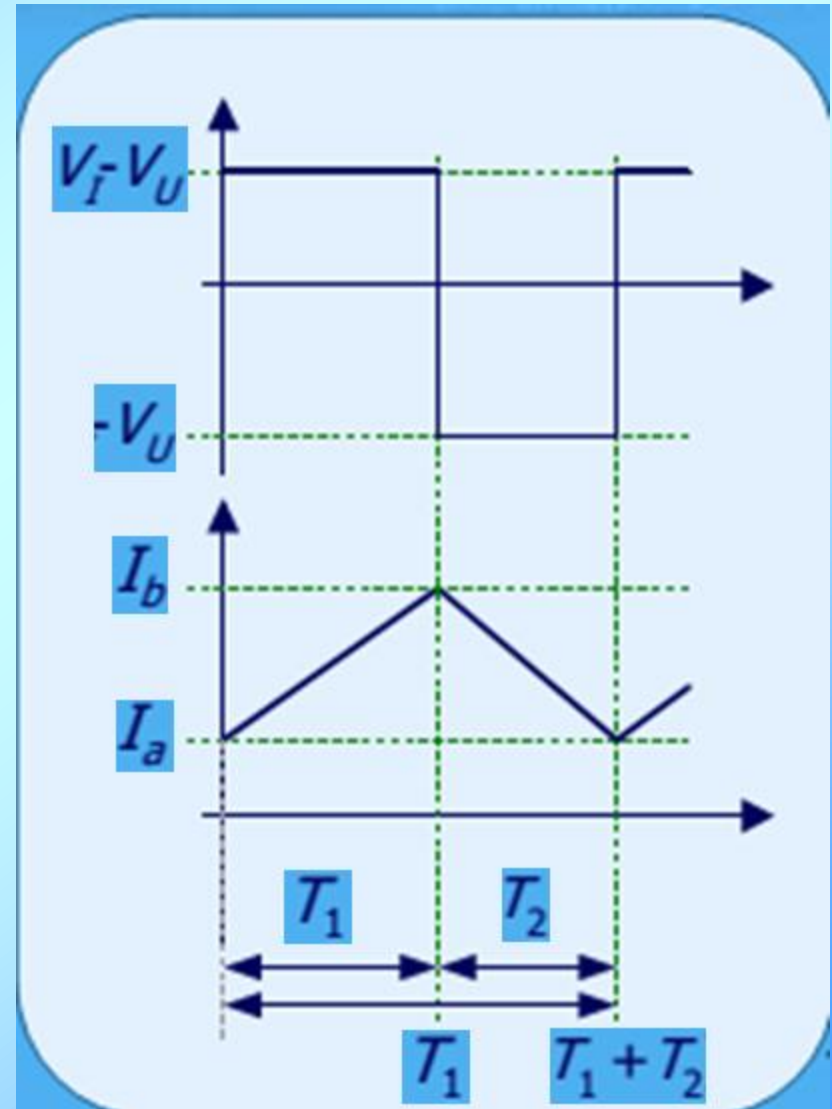
Buck-converter

- Si trascurano le cadute di tensione su D e su S
- Con S chiuso, la tensione ai capi di L vale $V_L = V_I - V_U$
- Con S aperto, la corrente in L continua a scorrere tramite D . Perché sia possibile, occorre che il verso della corrente sia concorde col diodo. Quindi:
 - Nel convertitore buck $V_I > V_U$



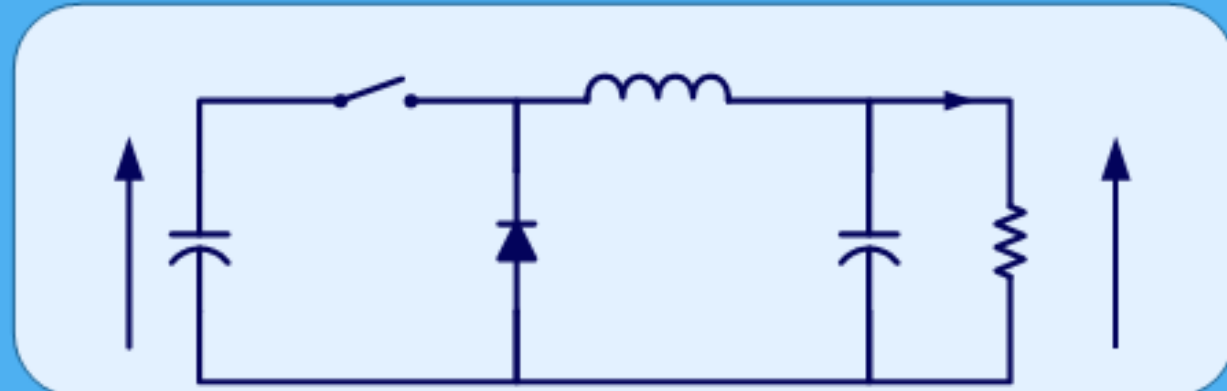
Buck-converter

- Indichiamo con I_a la corrente in L alla chiusura dell'interruttore
- Con S chiuso, $i_L(t) = I_a + t(V_F - V_U)/L$
- Al termine di T_1 la corrente avrà raggiunto il valore $I_b = I_a + T_1(V_F - V_U)/L$
- $I_b - I_a = T_1(V_F - V_U)/L$



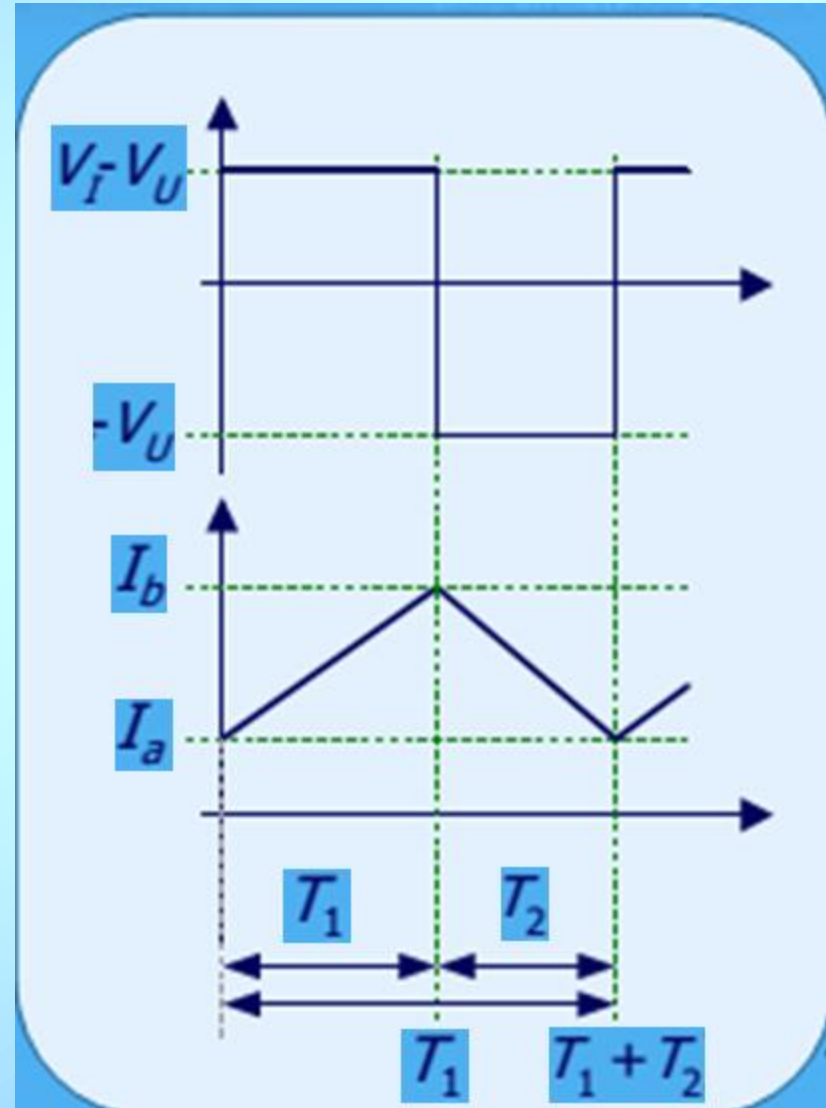
Buck-converter

- Con S aperto, la tensione ai capi di L vale $V_L = -V_U$
- Essendo V_U costante in un periodo, la corrente I_L sarà una rampa.
- Il valore finale dovrà coincidere con I_a (ipotesi di regime)



Buck-converter

- Con S aperto,
 $i_L(t) = I_b + t(-V_U) / L$
- Al termine di T_2 la
corrente avrà raggiunto
il valore
 $I_a = I_b - T_2 V_U / L$
- $I_b - I_a = T_2 V_U / L$



Buck-converter

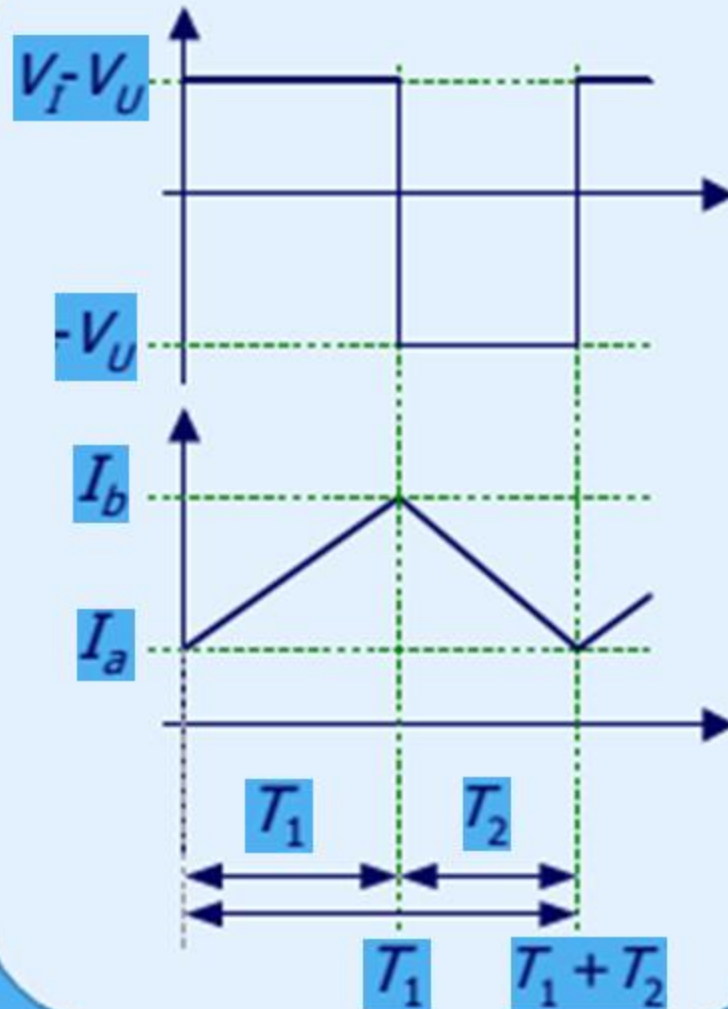
- La relazione trovata tra V_o e V_i dà una prima idea dei compiti dell'anello di controllo. Per variare la tensione d'uscita si dovrà agire su T_1 T_2 .
- Sono possibili diverse strategie:
 1. T_1 costante, T_2 variabile
 2. T_1 variabile, T_2 costante
 3. T_1 variabile, T_2 variabile, ma $T_1 + T_2$ costante
- Le prime due scelte implicano variazione della frequenza di commutazione, la terza no
- La scelta 3 permette filtraggio più semplice dei disturbi prodotti dalle commutazioni dell'interruttore

Buck-converter

➤ Eguagliando le due espressioni di $I_b - I_a$ si ottiene:

- $T_1(V_I - V_U) / L = T_2 V_U / L$
- $T_1 V_I = (T_1 + T_2) V_U$
- $V_U = V_I T_1 / (T_1 + T_2)$

➤ La relazione tra le tensioni di ingresso e di uscita è solo funzione dei valori di T_1 e T_2



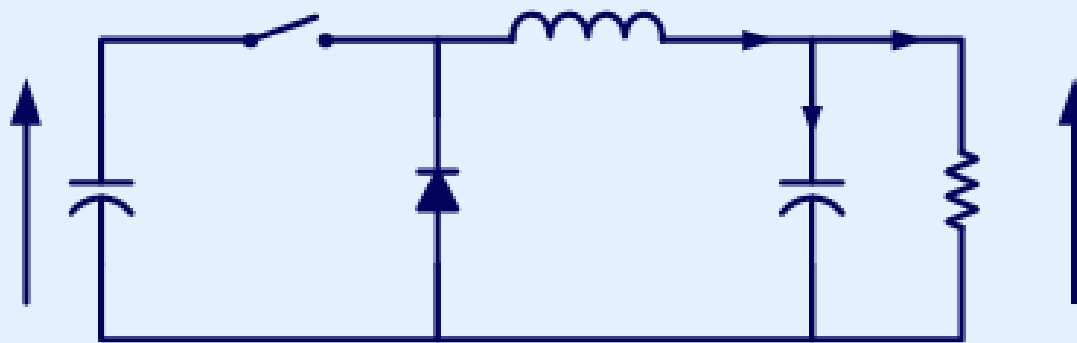
Buck-converter

($V_u < V_i \rightarrow$ è detto anche step-down;
siccome efficienza teorica è 100% allora
 $P_u = P_i$ e dunque $I_u > I_i$)

- Si definisce Duty-Cycle D la quantità
 - $D = T_1 / (T_1 + T_2)$
- La relazione tra V_u e V_i per il convertitore buck diventa:
 - $V_u / V_i = D$
- Il rapporto V_u / V_i nei convertitori switching si indica normalmente con M
 - $M = D$ per un convertitore buck in CCM
- Poiché D è compreso fra 0 e 1, si è riottenuto il risultato che V_u è minore o uguale a V_i

Buck-converter

- Quali sono le condizioni per lavorare in CCM?
- La funzione di C_u è di assorbire la parte variabile di I_L
- I_U coincide col valor medio di I_L e vale
 - $I_U = V_U / R_L$
- Il limite del funzionamento in CCM si ha per $I_a = 0$



Buck-converter

$$\frac{I_a + I_b}{2} = \frac{V_U}{R_L}$$

$$I_b - I_a = \frac{V_U}{L} T_2$$

➤ Espressione della corrente media nell'induttanza

➤ La differenza tra corrente massima e minima era già stata trovata prima, ma occorre esprimerla in funzione di D

Buck-converter

$$\frac{I_a + I_b}{2} = \frac{V_U}{R_L}$$

$$I_b - I_a = \frac{V_U}{L} T_2$$

► Dalla definizione di D si può ricavare un'espressione alternativa per T_2

$$D = \frac{T_1}{T_1 + T_2} = \frac{T_1}{T_{SW}}$$

$$T_2 = T_{SW}(1 - D)$$

$$T_2 = \frac{1 - D}{f_{SW}}$$

Buck-converter

$$\frac{I_a + I_b}{2} = \frac{V_U}{R_L}$$

$$I_b - I_a = \frac{V_U}{L} T_2$$

$$D = \frac{T_1}{T_1 + T_2} = \frac{T_1}{T_{SW}}$$

$$T_2 = T_{SW}(1 - D)$$

$$T_2 = \frac{1 - D}{f_{SW}}$$

► Le relazioni trovate finora possono essere combinate per ottenere un sistema

$$\begin{cases} I_b + I_a = \frac{2V_U}{R_L} \\ I_b - I_a = \frac{V_U}{L \cdot f_{SW}} (1 - D) \end{cases}$$

Spesso si dimensiona per
 $I_a = 0 \rightarrow I_b = I_{max} = 2 \cdot V_U / R_L = 2 \cdot I_U$

Buck-converter

- Risolvendo il sistema per I_a e imponendo che sia maggiore di zero si ottiene:

$$I_a = \frac{V_U}{R_L} - \frac{V_U}{2L \cdot f_{SW}}(1 - D)$$
$$L \cdot f_{SW} > \frac{R_L(1 - D)}{2}$$

**Spesso si dimensiona per
 $I_a=0 \rightarrow L=R_L \cdot (1-D)/2F_{sw}$**

Buck-converter

- Risolvendo il sistema per I_a e imponendo che sia maggiore di zero si ottiene:
- Quali sono i gradi di libertà?

- R_L rappresenta il carico, i limiti sono dati di progetto
- D dipende dalla tensione d'ingresso

$$I_a = \frac{V_U}{R_L} - \frac{V_U}{2L \cdot f_{SW}} (1 - D)$$
$$L \cdot f_{SW} > \frac{R_L (1 - D)}{2}$$

- f_{SW} si sceglie con considerazioni su ingombro, efficienza e EMC (50kHz-1MHz)
- L è l'unico grado di libertà

Buck-converter

- Non è possibile progettare un regolatore Buck che funzioni in CCM per qualunque condizione di carico e tensione d'ingresso
- Il modo di funzionamento dipende dal valore dei parametri di progetto e dalle condizioni operative
- Data la corrente minima del carico (R_{LMAX}) e la tensione massima d'ingresso (D_{MIN}) è possibile trovare la L_{MIN} che garantisce il CCM in condizioni nominali

$$L > \frac{R_{LMAX}(1 - D_{MIN})}{2 \cdot f_{SW}}$$

Buck-converter

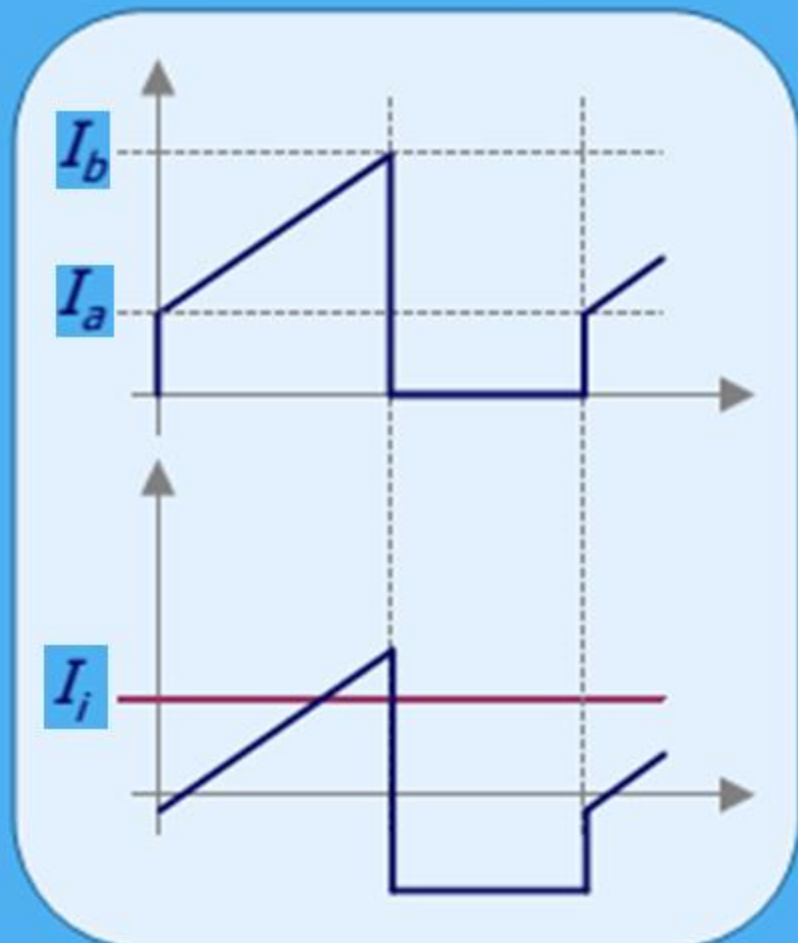
- Il convertitore buck CCM è un buon alimentatore?
- Regolazione di carico: $\Delta V_U / \Delta I_U = 0$
 - La tensione d'uscita dipende solo da tensione d'ingresso e Duty-Cycle, quindi è un buon generatore di tensione (finché si è in CCM)
- Regolazione di linea: $\Delta V_U / \Delta V_I = D$
 - E' compito del sistema di controllo stabilizzare la tensione d'uscita: il guadagno d'anello deve essere elevato
- Con S e diodo ideali il rendimento è del 100%

Buck-converter

- Che cosa succede in caso di anomalie in ingresso o uscita?
- Cortocircuito in uscita: OK
 - il sistema di controllo può facilmente controllare la corrente d'uscita e ridurre D in caso di sovraccarico
- Sovratensioni in ingresso: KO
 - L'interruttore è collegato direttamente all'ingresso, quindi è esposto alle sovratensioni d'ingresso

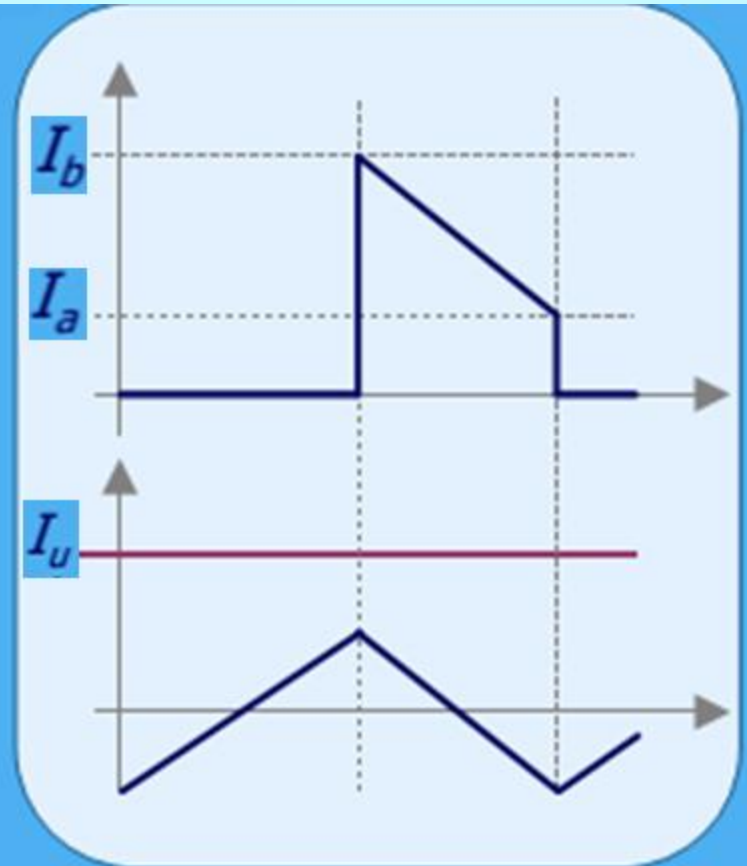
Buck-converter, correnti ingresso

- Abbiamo visto le forme d'onda sull'induttore. E il resto del circuito?
- i_S , corrente nell'interruttore, scorre solo quando S è chiuso, ed è la stessa di i_L durante T_1
- La corrente in C_f è quella dell'interruttore privata del valor medio
- La corrente d'ingresso I_i è il valor medio di i_S



Buck-converter, correnti di uscita

- La corrente nel diodo scorre solo quando S è aperto, ed è anch'essa pari a I_L (durante T_2)
- La corrente in C_u è pari al ripple della corrente nell'induttanza
- La corrente I_u è pari al valor medio della corrente nell'induttanza



Buck-converter, correnti

► Dall'esame delle correnti si deduce che:

- Il convertitore produce bassi disturbi in uscita (non vi sono salti di corrente).
- La corrente d'ingresso invece è impulsiva, quindi un convertitore buck inietta facilmente disturbi nei circuiti a monte.
- Considerazioni analoghe portano a dire che il condensatore d'uscita sarà sottoposto a bassi stress (corrente RMS bassa) mentre quello d'ingresso sarà molto più sollecitato.

Buck-converter

esempio di dimensionamento

Specifiche: V_i sia 36V DC e V_u 12V DC, con I_u 10 A

Ne segue che $P_{out}=120W$ e $R_L=1.2 \text{ Ohm}$

Duty cycle $D=V_u/V_i=1/3$

Se scelgo componenti di potenza pilotati con frequenza di switch
 $F_{sw}=100 \text{ kHz}$ (periodo $T_{sw}=10 \text{ us}$) $\rightarrow T_1=3.33 \text{ }\mu\text{s}$, $T_2=6.66 \text{ }\mu\text{s}$

Imponendo che $I_a=0 \rightarrow$

$L=R_L*(1-D)/2F_{sw}= 1.2 *0.66/200k \text{ H}=4 \text{ }\mu\text{H}$ e

$I_b=I_{max}=2*I_u=20A$

C in uscita è tale che $1/\sqrt{LC} \ll 2*3.14*F_{sw}=628k \text{ rad/s}$

Es con $C= 100\mu\text{F}$ si ha $1/\sqrt{LC}=50k \text{ rad/s}$

Buck-converter

esempio di dimensionamento

Basta dunque selezionare BJT(o MOS) e diodi con:

I_{max} di almeno 20A

V_{max} di almeno V_{in} (36V)

Tempi di accensione/spegnimento e rise/fall inferiori ai 3.3/6.6.
 μs (bastano anche sulle centinaia di ns)

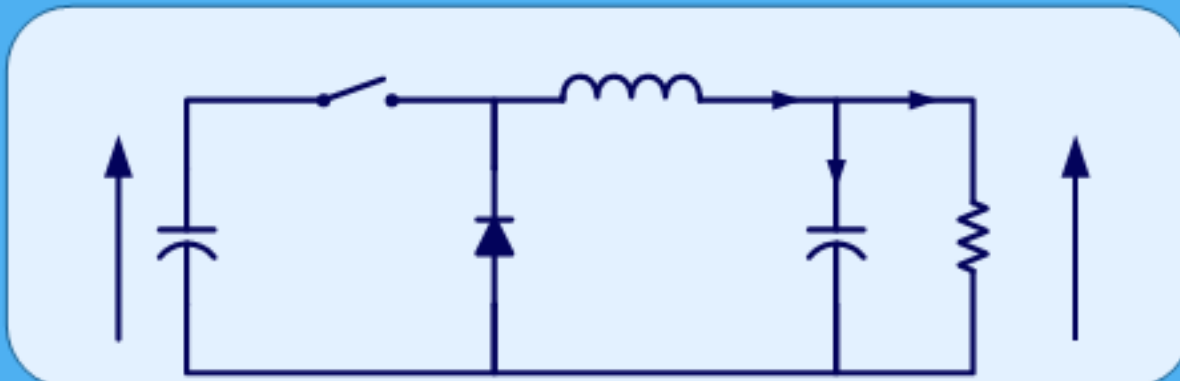
L da 4 μH con correnti tra 0 e 20 A (10A in media)

C_u da 100 μF con correnti tra -10A e 10 A (0 in media)

Ingresso ha corrente media pari a quella dello switch S che è in media 10A durante T1 e 0 durante T2 e dunque vale in media $10A \cdot T1 / (T1 + T2) = 3.33A$ (varia tra 0 e 20 A)

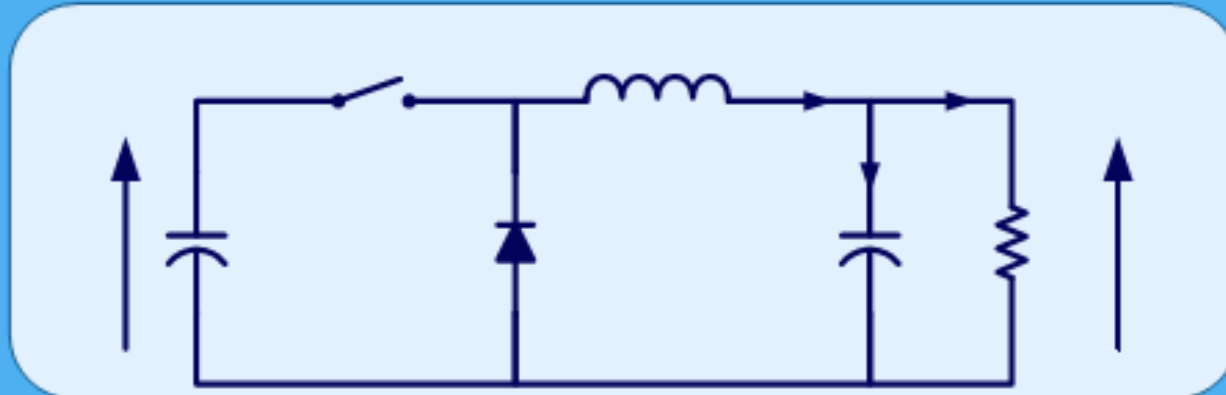
Buck-converter, perdite su switch

- Come variano le caratteristiche considerando la caduta di tensione sul diodo e sullo switch?
- Per quanto riguarda il diodo, esso modifica la tensione ai capi di L durante T_2 :
 - $i_L(t) = I_b + t(-V_U - V_D)/L$



Buck-converter, perdite su switch

- Se lo switch è un BJT, provoca una caduta di tensione costante V_S , che cambia il valore di V_L durante T_1 :
 - $i_L(t) = I_a + t(V_F V_U - V_S)/L$
- Nel caso di MOS, il comportamento è resistivo:
 - $V_S = i_L \cdot R_{ON}$
 - Il valor medio di i_L è I_U , quindi $V_S = V_U \cdot R_{ON} / R_L$

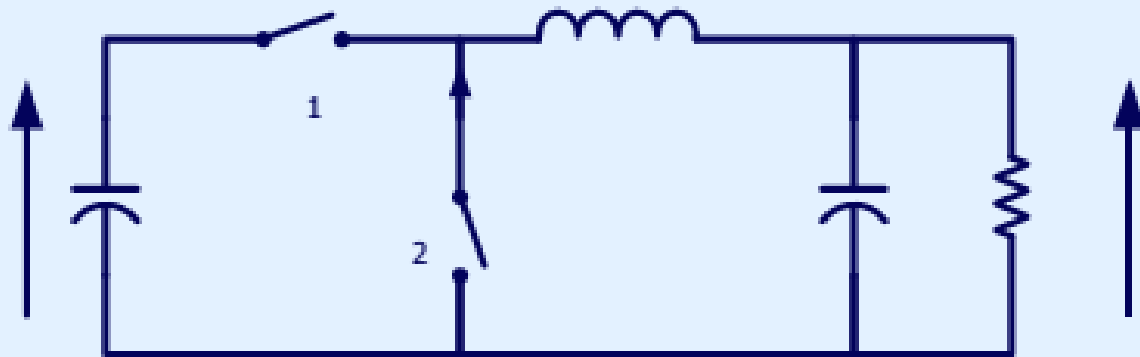


Buck-converter, perdite

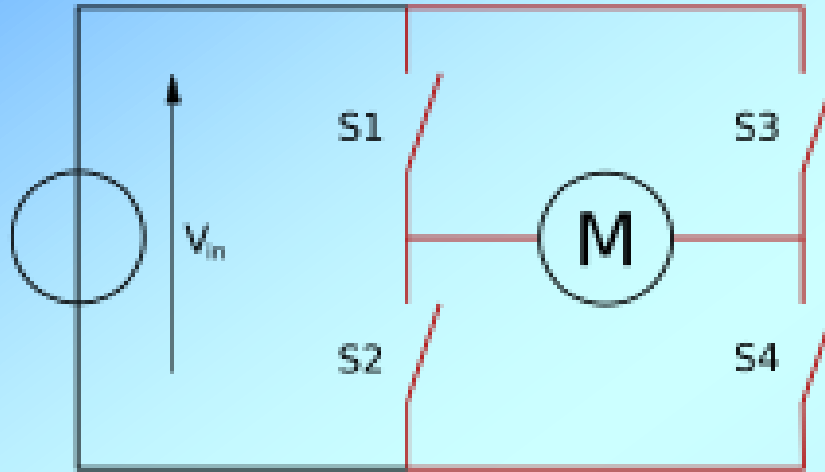
- Le equazioni precedenti permettono di calcolare facilmente la transcaratteristica tenendo conto delle cadute su diodo e switch.
- Altro parametro da considerare è la componente resistiva dell'induttore.
- Tutte queste considerazioni portano ad una definizione leggermente diversa della transcaratteristica, che viene però compensata dall'anello di controllo (D deve essere leggermente più alto per avere V_U voluta).
- Le cadute di tensione su diodo, switch e sulla componente resistiva dell'induttanza provocano anche dissipazione di potenza
- Altra potenza viene dissipata nelle commutazioni dell'interruttore e nella ESR dei condensatori
- In generale, il fattore predominante per il rendimento è il comportamento dello switch, ma anche la caduta sul diodo può essere un problema, specie in caso di basse tensioni d'uscita.

Synchronous rectifier

- Un modo per migliorare il rendimento è sostituire il diodo con uno switch: si parla di synchronous rectifier.
- S_2 deve essere chiuso durante T_2 ma deve essere aperto se I_{S2} va a zero (DCM).
- Anello di controllo più complesso (deve leggere I_{S2})

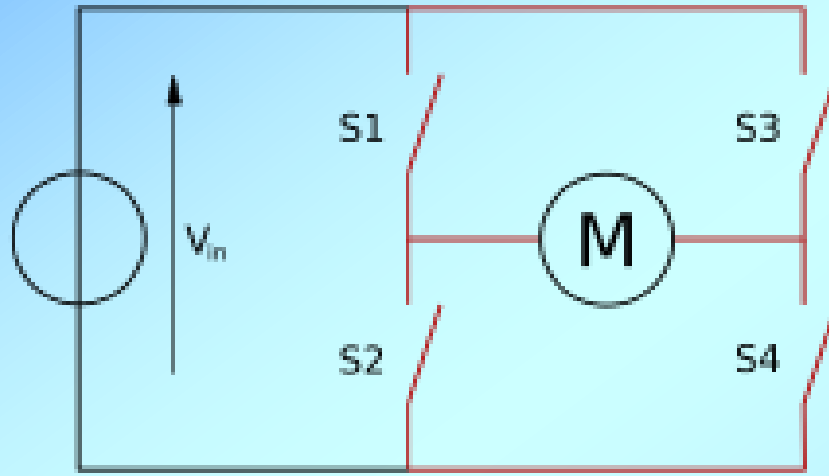


Da Half a Full Bridge



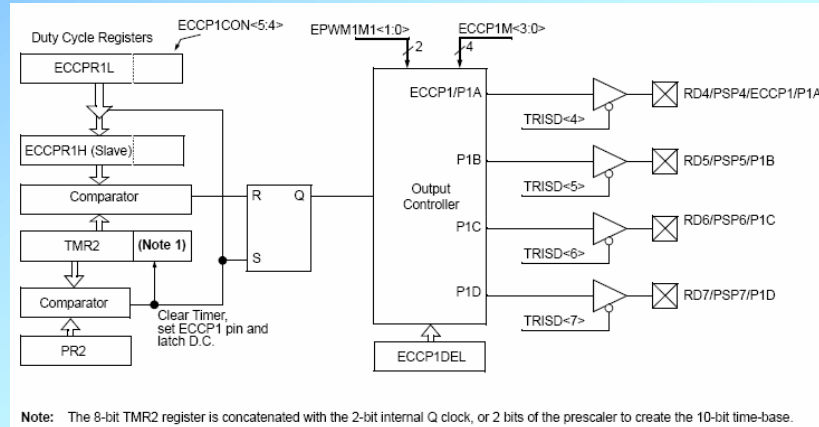
Può funzionare nei quattro quadranti del piano corrente-tensione sul carico. Corrente e tensione di carico possono essere sia positive che negative. Per un carico induttivo, es. un motore in continua, questo tipo di convertitore può controllare il flusso di potenza e la velocità del motore nel funzionamento diretto (tensione e corrente di carico positive), nella frenatura a recupero diretto (tensione di carico positiva e corrente di carico negativa), nel funzionamento inverso (tensione e corrente di carico negative). Lo schema del convertitore viene realizzato mediante una struttura detta “ponte H”

Da Half a Full Bridge

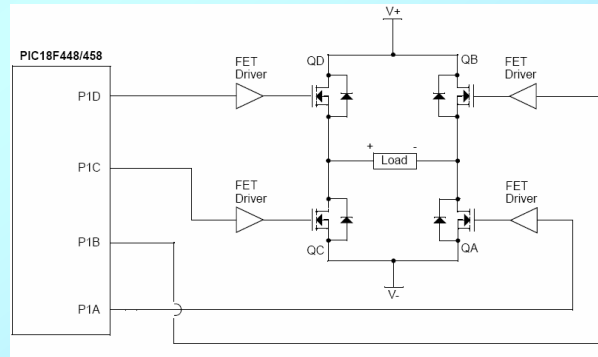
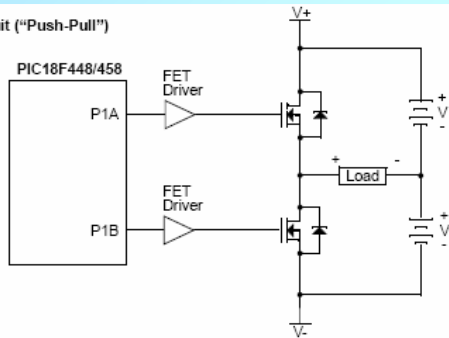


La tensione di ingresso è fissa e pari a V_d , mentre quella di uscita è pari a V_0 e può essere controllata in ampiezza e polarità, variando gli istanti di conduzione degli switch. Gli switch dello stesso ramo non possono condurre simultaneamente, ovvero non può avvenire l'accensione contemporanea dei transistor di una stessa gamba, per evitare i cosiddetti “corti di gamba”, che distruggerebbero i componenti del ramo, nella pratica vi sarà un intervallo di tempo molto piccolo (detto blanking time) in cui gli switch della stessa gamba saranno in condizione di off.

Controlli da MCU per Half e Full Bridge



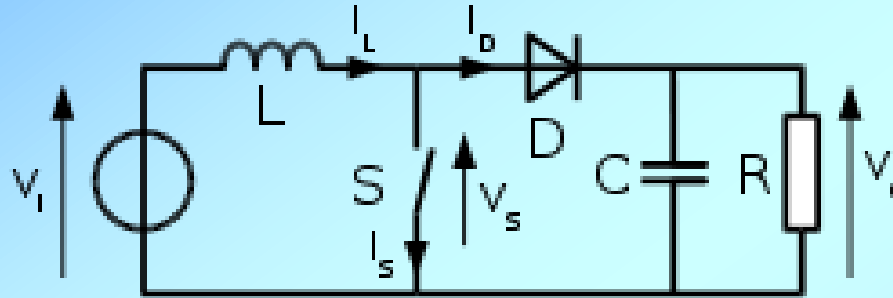
Standard Half-Bridge Circuit ("Push-Pull")



MCU con algoritmo di controllo genera internamente i segnali per comandare half e full bridge (Gate driver necessari se out di MCU non ha abbastanza tensione/corrente per pilotare Power Switch, es IGBT con 2500 pF 10V su Gate in 100 ns chiede 250 mA ($I=C \cdot dV/dt$))

Boost converter

(detto anche Step-up converter)

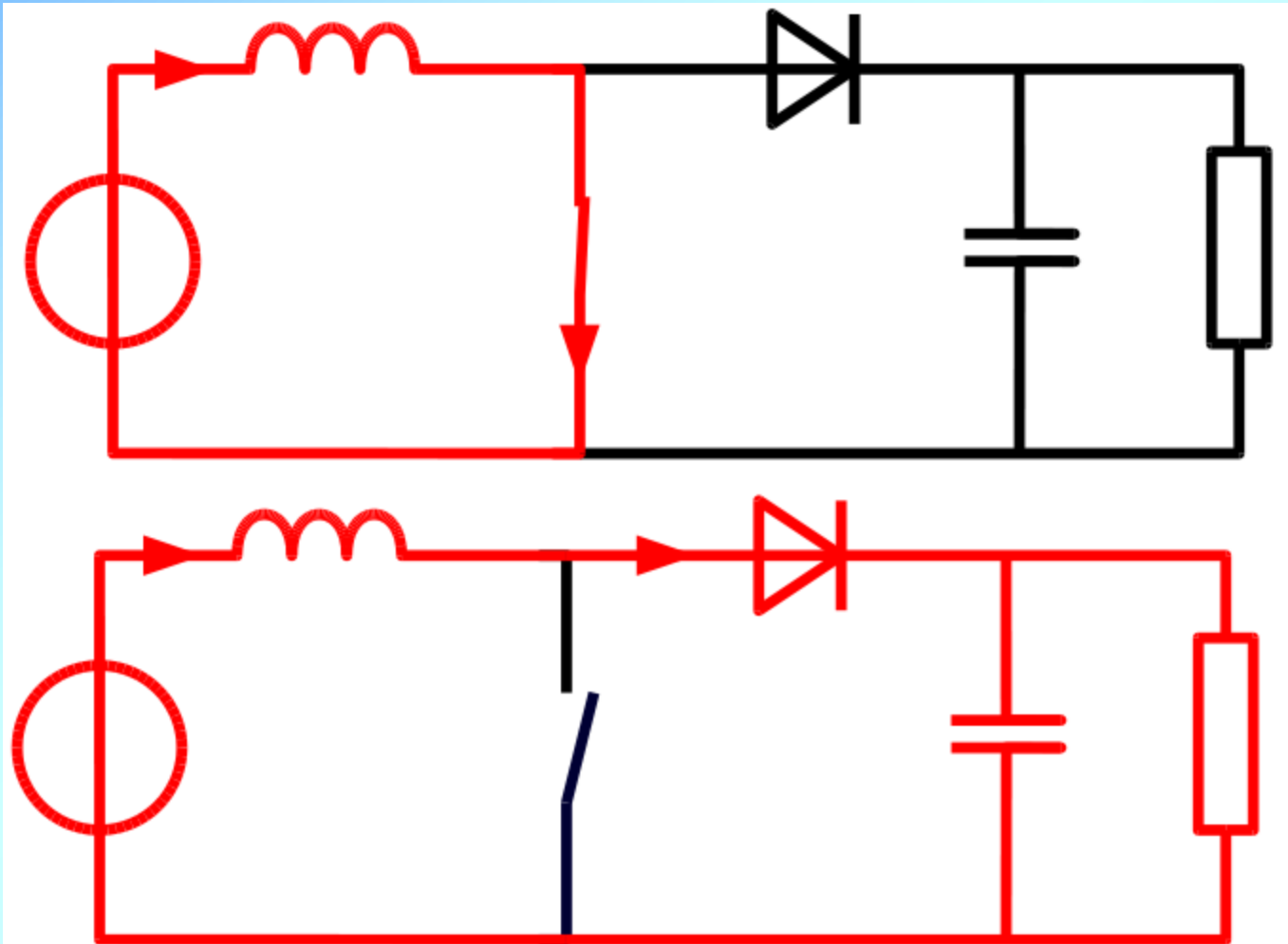


Una volta compreso il buck converter, le altre topologie sono ricavabili seguendo gli stessi principi.

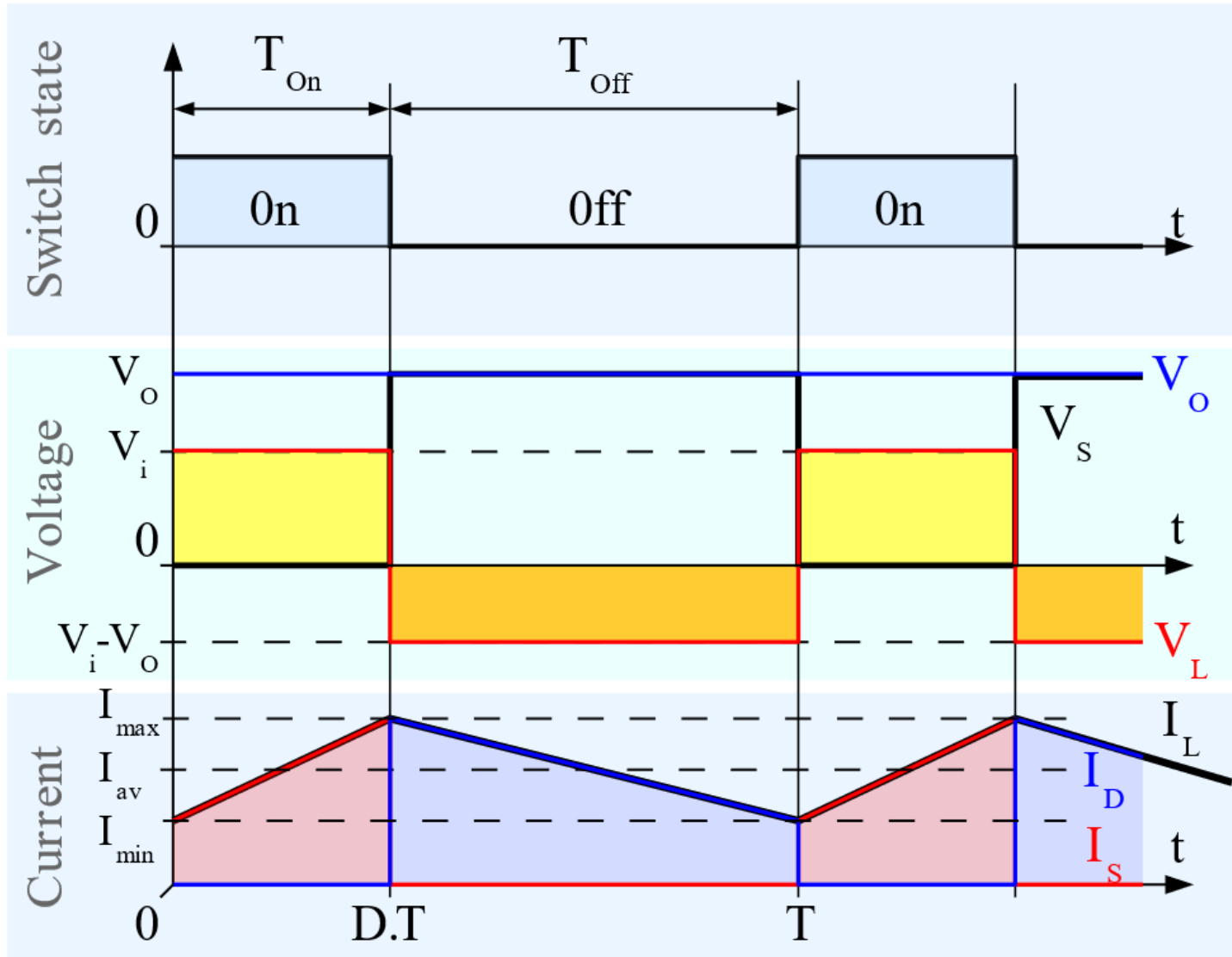
Ad esempio il boost converter è usato per avere una tensione di uscita più grande di quella di ingresso (la corrente sarà minore non potendo avere rendimenti maggiori di uno)

$$V_o = V_i / (1 - D)$$

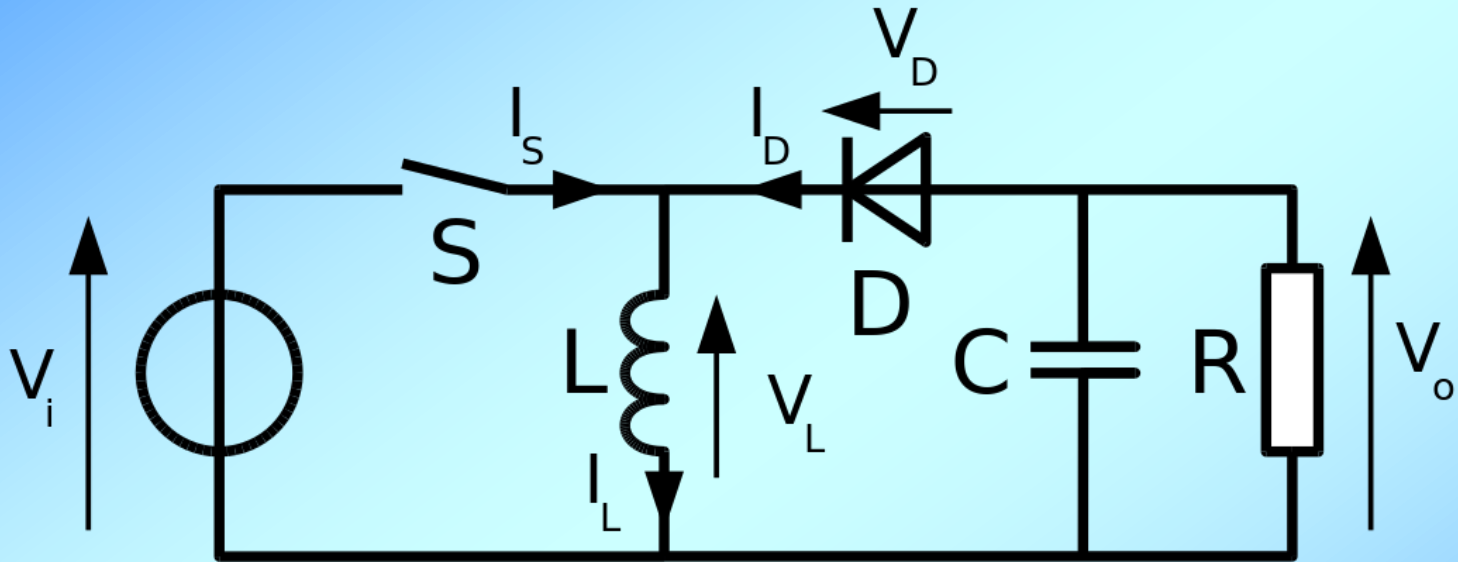
Boost converter



Boost converter



Buck-Boost converter

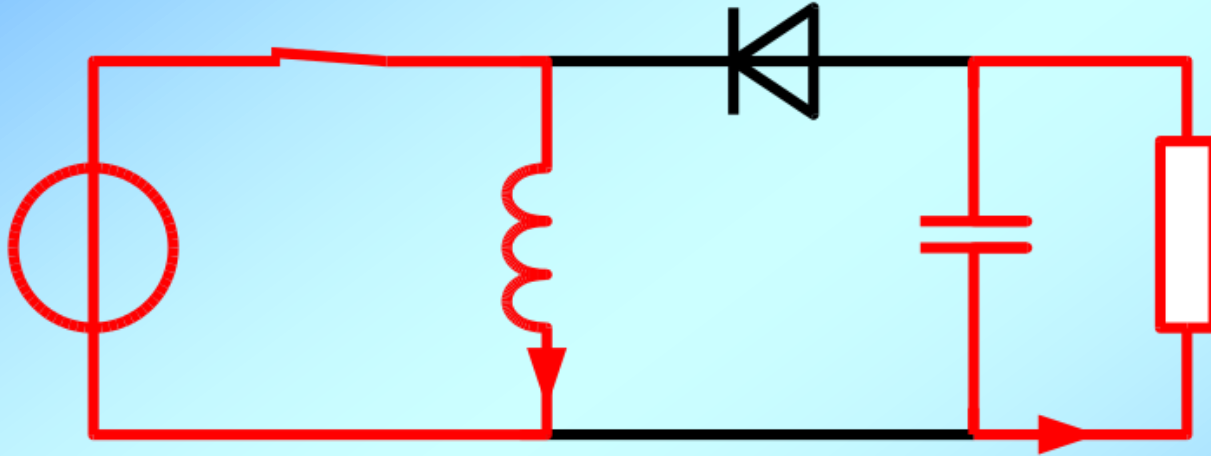


Buck-Boost converter usato per avere una tensione di uscita in opposizione di fase a quella di ingresso, sia minore che maggiore in modulo

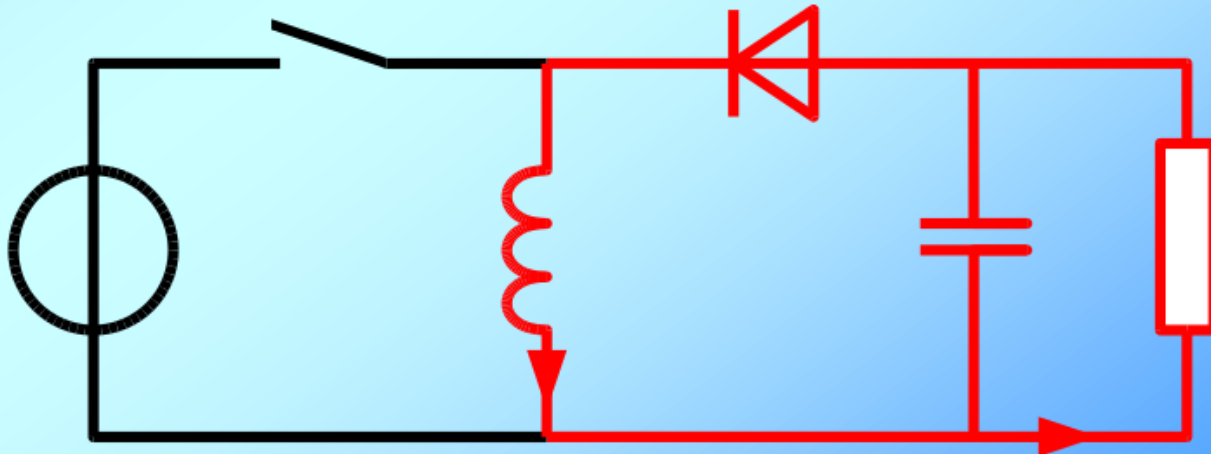
$$\text{Abs}(V_o) = \text{Abs}(V_i) * D / (1 - D)$$

Buck-Boost converter

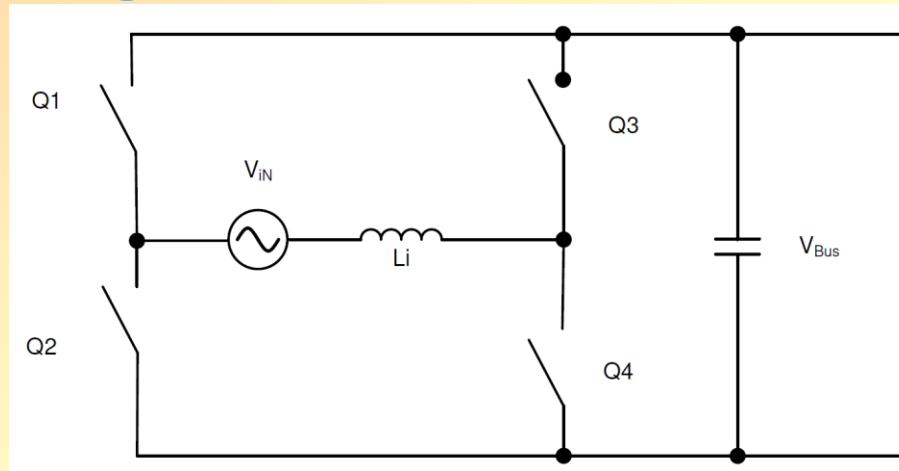
On-State



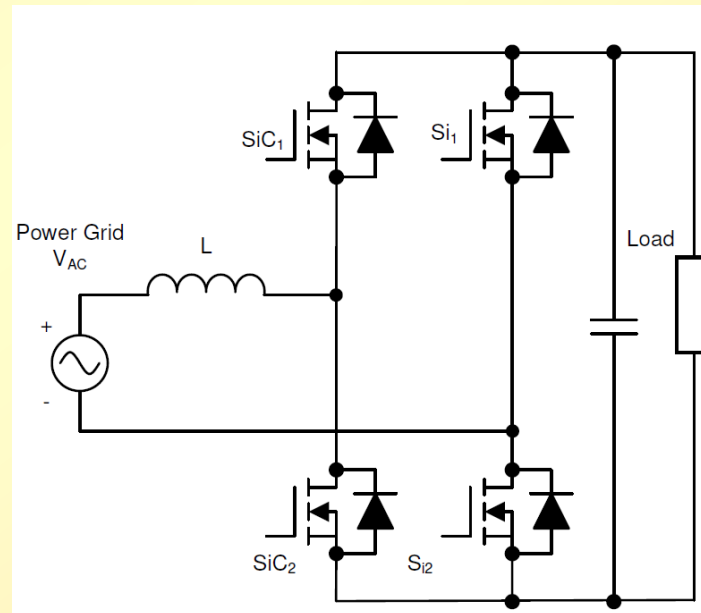
Off-State



MOS Bridge anche per AC/DC



Totem-Pole Bridgless AC/DC conversion con SiC MOSFET per on-board power charger (grazie a SiC Mosfet reggono tensione di linea)



MOS Bridge anche per AC/DC

A differenza di AC/DC con regolatori a SCR sorgente in AC (rete) vede assorbimento come se carico fosse resistivo anche se carico ha parte reattiva
→ ottima PFC (Power Factor Correction)

https://www.ti.com/lit/ug/tidu54b/tidu54b.pdf?ts=1593108591005&ref_url=https%252F%252Fwww.ti.com%252Ftool%252FTIDA-01604

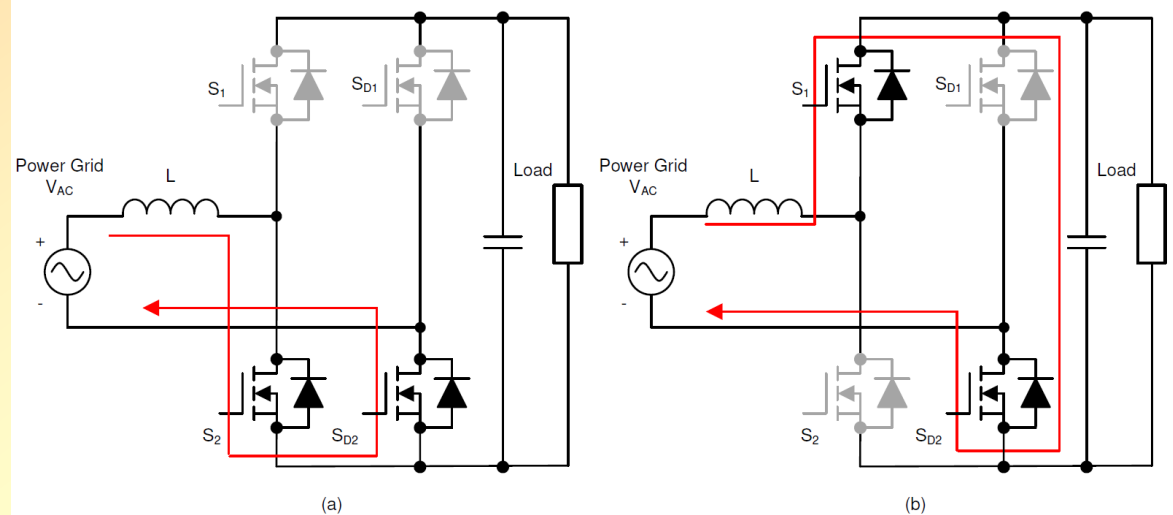


Figure 2. Totem-Pole Bridgeless PFC Operation During Positive Half Cycle:
(A) While S_2 is Switched ON (B) While S_2 is Switched OFF

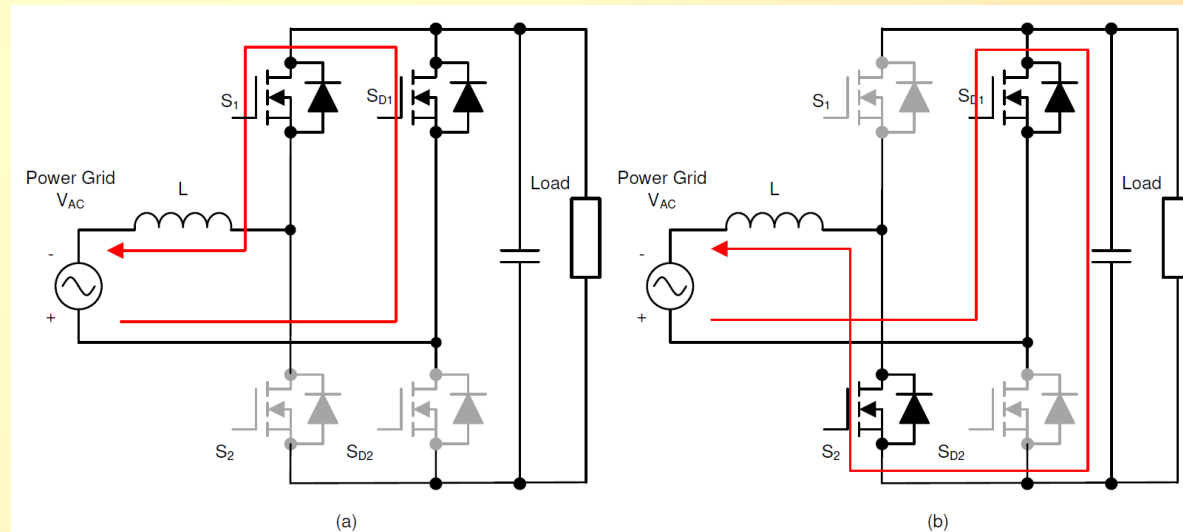
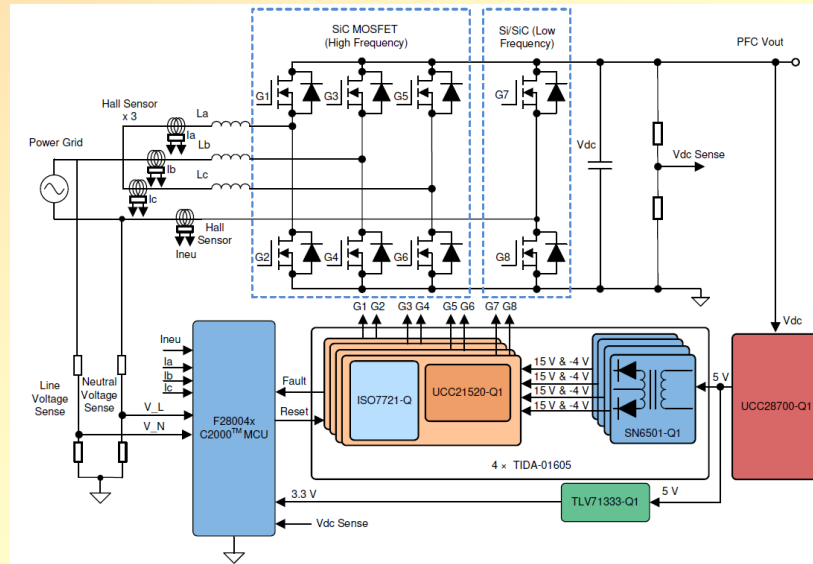


Figure 3. Totem-Pole Bridgeless PFC Operation During Negative Half Cycle:
(A) While S_1 is Switched ON (B) While S_1 is Switched OFF

6.6 kW on-board charger con SiC MOSFET Bridge (trifase e neutro)



EMI Filter



Power Inductors



Auxiliary Power Supply



C2000 Controller Card



TIDA-01605



DC Link Capacitors