

INTRODUZIONE AI CONVERTITORI RISONANTI E SOFT-SWITCHING

Prof. Simone CASTELLAN

[1] N.Mohan, T.M.Undeland and W.P.Robbins, *Power electronics – Converters, applications, and design*, John Wiley & Sons, 1995.

Versione italiana: *Elettronica di potenza – Convertitori ed applicazioni*, Hoepli, 2005.

[2] M.H.Rashid, *Power electronics handbook*, Chap. 11, 5th edition, Elsevier - BH, 2024.

INTRODUZIONE

Nella commutazione forzata, o “hard-switching” (HSW), gli interruttori devono condurre ed interrompere tutta la corrente di carico durante ogni commutazione; sono quindi soggetti ad elevate perdite (p_p), che aumentano all'aumentare della frequenza di commutazione.

Un altro problema della commutazione forzata è rappresentato dai disturbi elettromagnetici emessi a causa delle elevate derivate di corrente e di tensione.

Questi problemi diventano insormontabili se la frequenza di commutazione viene aumentata oltre certi limiti. Ad esempio per convertitori con potenza di qualche kW si hanno frequenze di commutazione massime di 20-50 kHz.

Al fine di superare questi limiti si è percorsa l'idea di utilizzare dei circuiti risonanti all'interno dei convertitori in modo da ottenere tensioni e/o correnti oscillanti (generalmente in modo sinusoidale) allo scopo di far sì che ciascun interruttore di un convertitore cambi il suo stato quando è nulla almeno una fra la tensione su di esso e la corrente che lo attraversa. Questo consente di ridurre drasticamente le perdite per commutazione, tanto da poter raggiungere frequenze di commutazione di centinaia di kHz (tipicamente 100-500 kHz) e quindi aumentare la densità di potenza dei convertitori e ridurre la taglia dei componenti magnetici.

Il loro svantaggio rispetto ai convertitori a commutazione forzata è che le correnti e le tensioni risonanti hanno elevati valori di picco, che quindi portano ad elevate perdite di conduzione e richiedono l'utilizzo di componenti in grado di sopportare correnti e tensioni di picco elevate. Inoltre molti convertitori risonanti richiedono l'impiego della modulazione di frequenza per la regolazione della tensione e della potenza di uscita, ma la variabilità della frequenza di commutazione rende più complesso il controllo e il progetto dei filtri.

INTRODUZIONE

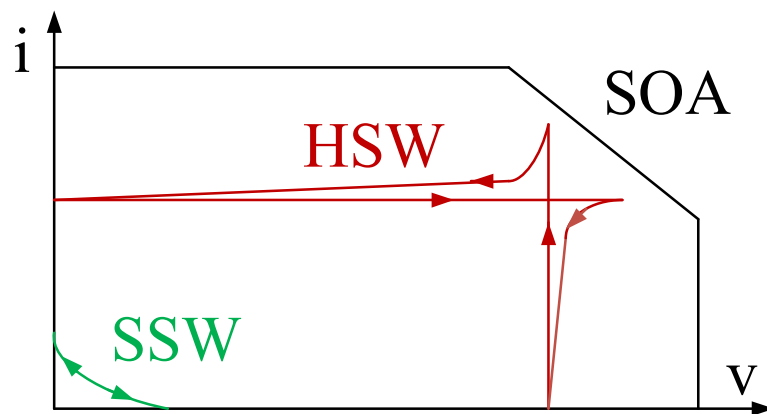
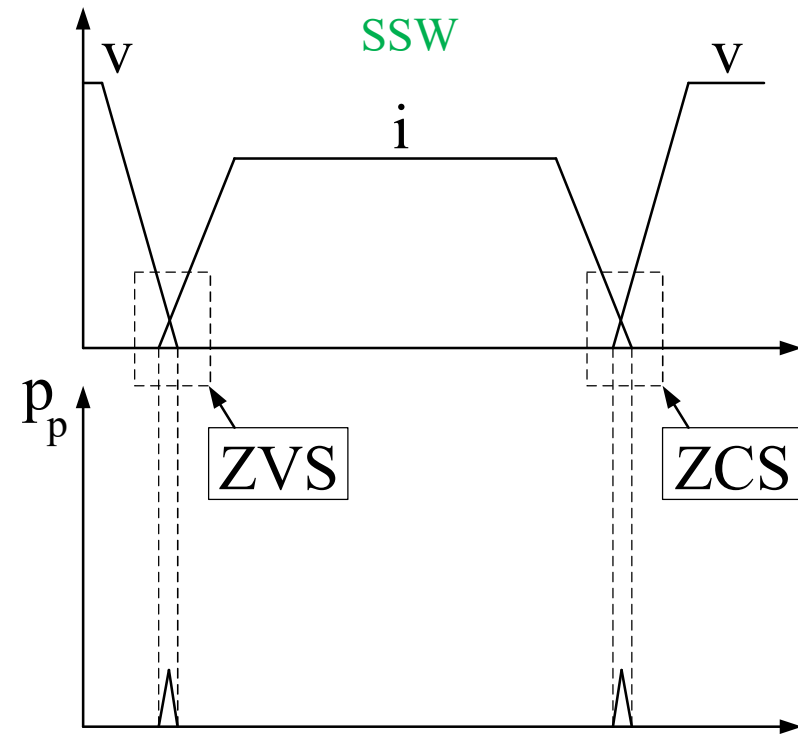
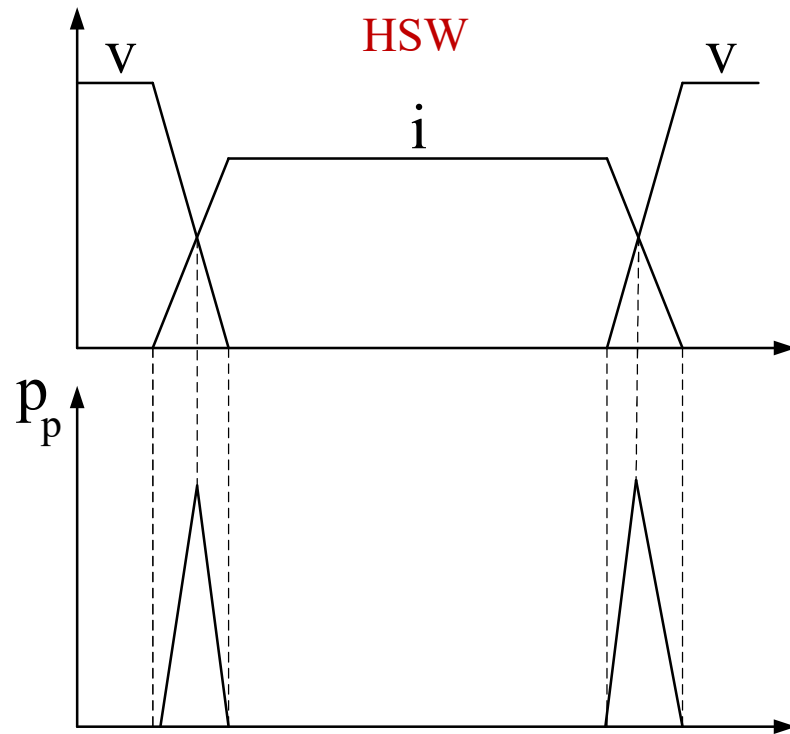
In una fase successiva sono stati apportati dei miglioramenti ai convertitori risonanti, combinando i vantaggi dei convertitori a commutazione forzata e dei convertitori risonanti. Negli anni 90 è quindi nata una nuova generazione di convertitori, detta convertitori risonanti “soft switching” (SSW). Questi ultimi sono caratterizzati da forme d’onda simili a quelle dei convertitori a commutazione forzata, eccetto per il fatto che i fronti di salita e di discesa sono meno ripidi e non presentano impulsi transitori. Inoltre, a differenza dei convertitori risonanti, utilizzano la risonanza in maniera controllata, cioè si fa sì che la risonanza abbia luogo solamente appena prima e durante i processi di chiusura e apertura degli interruttori in modo da creare le condizioni per la commutazione a tensione o a corrente nulla. Date queste caratteristiche, i convertitori risonanti “soft switching” consentono di aumentare ulteriormente la frequenza di commutazione (da 500 kHz fino a pochi MHz, a seconda della potenza). Costituiscono inoltre una efficace soluzione per ridurre i disturbi elettromagnetici.

Esistono convertitori risonanti “soft switching” che effettuano la conversione cc/cc, ca/cc e cc/ca.

Vengono utilizzati in applicazioni quali: riscaldamento ad induzione, convertitori cc/cc a frequenza molto elevata, trasmettitori sonar, alimentatori per lampade fluorescenti (ballast), alimentatori per macchine da taglio laser, generatori di ultrasuoni, ecc.

Esistono varie tecniche di commutazione soft; tra queste vi sono lo “zero voltage switching” (ZVS), lo “zero current switching” (ZCS), lo “zero voltage switching with clamped voltage” (ZVS-CV), e lo “zero voltage transition”.

COMMUTAZIONE FORZATA E SOFT

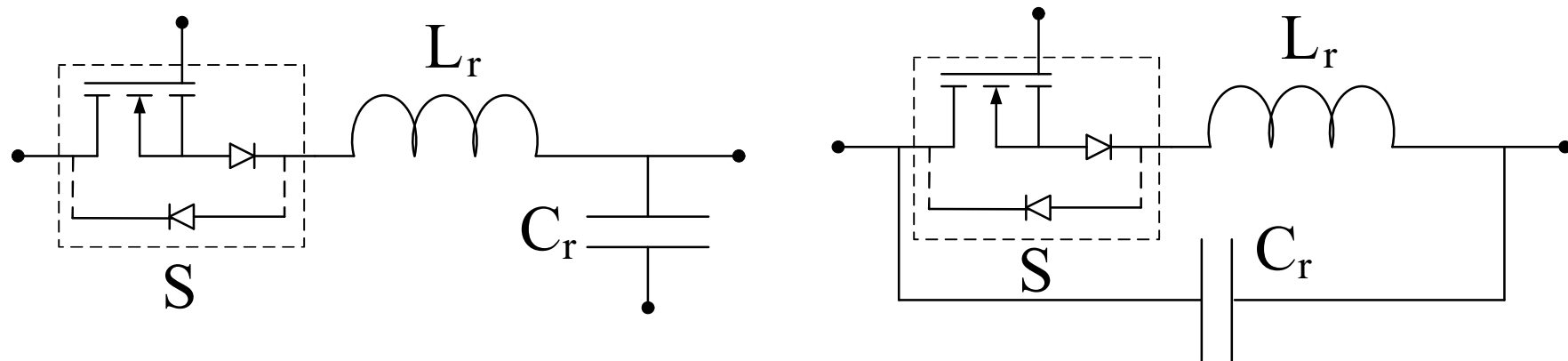


Se durante la fase di chiusura la tensione ai capi dell'interruttore va a zero prima che il dispositivo inizi a condurre si parla di commutazione a tensione nulla o "zero voltage switching" (ZVS); se invece durante la fase di apertura la corrente va a zero prima che la tensione ai capi dell'interruttore aumenti si parla di commutazione a corrente nulla o "zero current switching" (ZCS).

INTERRUTTORE RISONANTE

Un interruttore risonante include un interruttore elettronico S (che può essere bidirezionale o unidirezionale a seconda che ci sia o no il diodo in antiparallelo) e gli elementi risonanti L_r e C_r .

Interruttori risonanti a corrente nulla (ZC): un induttore L_r è connesso in serie ad S per ottenere la commutazione ZCS.



Se S è unidirezionale la corrente dell'interruttore può essere soggetta a risonanza solo nella semionda positiva. In questo caso si dice che S lavora in *modalità a semionda*.

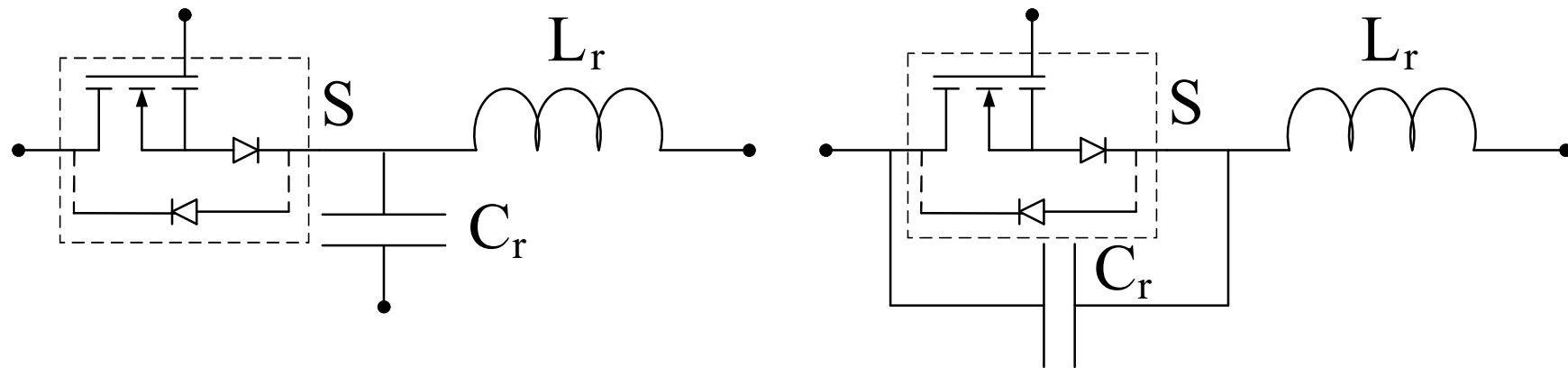
Se è bidirezionale, S può invece lavorare in *modalità a doppia semionda*.

In fase di accensione la corrente aumenta lentamente e poi oscilla a causa della risonanza fra L_r e C_r . Infine S può essere commutato al successivo intervallo a corrente nulla.

Lo scopo degli interruttori risonanti ZC è quello di modellare la forma d'onda della corrente nell'intervallo di conduzione in modo da creare la condizione di corrente nulla per la fase di spegnimento.

INTERRUTTORE RISONANTE

Interruttori risonanti a tensione nulla (ZV): un condensatore C_r è connesso in parallelo ad S per ottenere la commutazione ZVS.



Se S è unidirezionale la tensione ai capi di C_r può oscillare liberamente sia nella semionda negativa che in quella positiva. In questo modo S può lavorare in *modalità a doppia semionda*.

Se S è bidirezionale, durante la semionda negativa la tensione ai capi di C_r viene bloccata a zero dal diodo in antiparallelo e quindi S lavora in *modalità a semionda*.

Lo scopo degli interruttori risonanti ZV è quello di far ricorso al circuito risonante per modellare la forma d'onda della tensione ai capi di S nell'intervallo in cui è spento in modo da creare la condizione di tensione nulla per la fase di accensione.

CLASSIFICAZIONE DEI CONVERTITORI RISONANTI

Non è immediato fare una classificazione di questa categoria di convertitori, perché ne esistono di svariate tipologie, con diverso principio di funzionamento e con diversi ingressi e uscita (in continua o alternata).

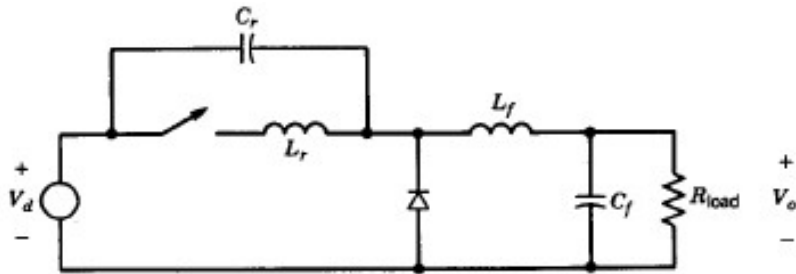
Una possibile classificazione dei convertitori risonanti è fornita in [1] dove, basandosi sul principio di funzionamento e sulla struttura circuitale, vengono identificate le seguenti quattro categorie principali:

- 1) *convertitori a interruttore risonante,*
- 2) *convertitori a carico risonante,*
- 3) *convertitori a “dc-link” risonante,*
- 4) *convertitori con ingresso in alta frequenza a integrazione di semi-periodi.*

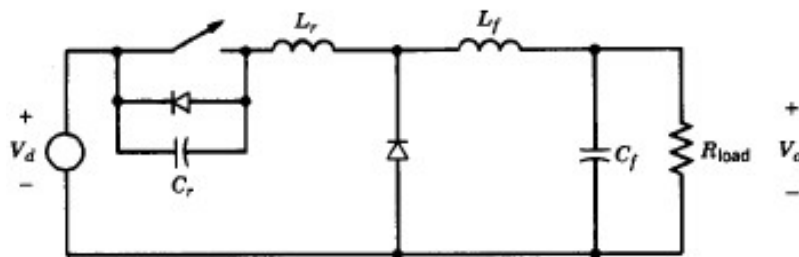
CONVERTITORI A INTERRUTTORE RISONANTE

Sono convertitori cc/cc e si basano su interruttori risonanti. In un periodo di commutazione ci sono intervalli di funzionamento con risonanza e senza risonanza; per questo motivo sono anche detti convertitori quasi risonanti. Possono essere a loro volta suddivisi in tre categorie:

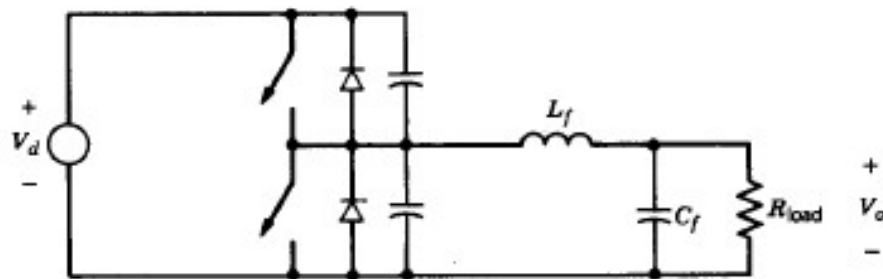
- 1) **convertitori con commutazione a corrente nulla (ZCS),**
- 2) **convertitori con commutazione a tensione nulla (ZVS),**
- 3) **convertitori con commutazione a tensione nulla e tensione agganciata (ZVS-CV).**



Buck ad interruttore risonante con ZCS (l'interruttore deve condurre la corrente di picco risonante, ma la tensione di picco ai suoi capi rimane la stessa del corrispettivo convertitore a commutazione forzata).



Buck ad interruttore risonante con ZVS (l'interruttore è sottoposto alla tensione di picco risonante, ma la corrente di picco che deve condurre rimane la stessa del corrispettivo convertitore a commutazione forzata).



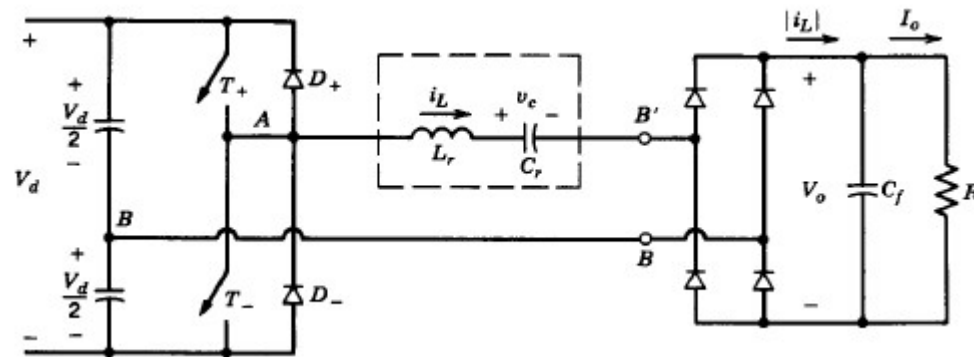
Convertitore abbassatore ad interruttore risonante con ZVS-CV (la tensione di picco ai suoi capi rimane la stessa del corrispettivo convertitore a commutazione forzata, ma la corrente di picco è generalmente più elevata).

CONVERTITORI A CARICO RISONANTE

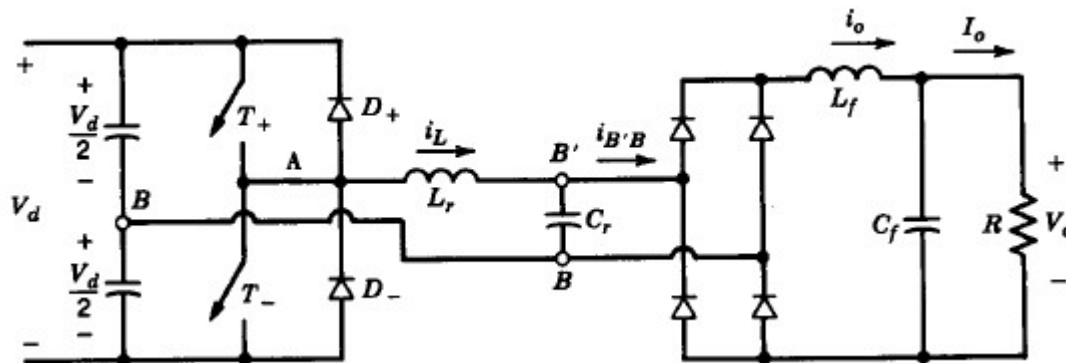
Sono convertitori in cui un circuito LC risonante provoca l'oscillazione delle tensioni e correnti in modo da rendere possibile la commutazione a tensione nulla o corrente nulla.

Il flusso di potenza verso il carico è controllato per mezzo dell'impedenza del circuito risonante, la quale a sua volta è controllata variando la frequenza di commutazione in rapporto alla frequenza di risonanza. Possono essere a loro volta suddivisi in tre categorie.

- 1) **Convertitori cc/cc a tensione impressa a risonanza serie**, che possono essere: a) *a carico serie (series-loaded)*, b) *a carico parallelo (parallel-loaded)*, c) *ibridi*.
- 2) **Convertitori cc/ca a corrente impressa a risonanza parallelo**.
- 3) **Convertitori cc/ca (cc/cc se si raddrizza la tensione di uscita) risonanti di classe E**.

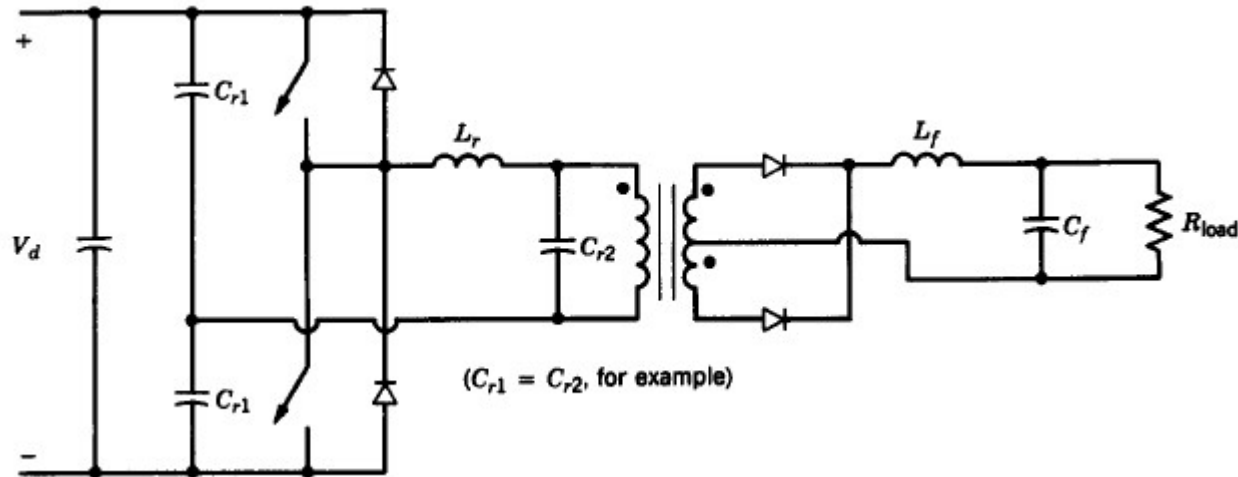


Convertitore cc/cc risonante a carico serie

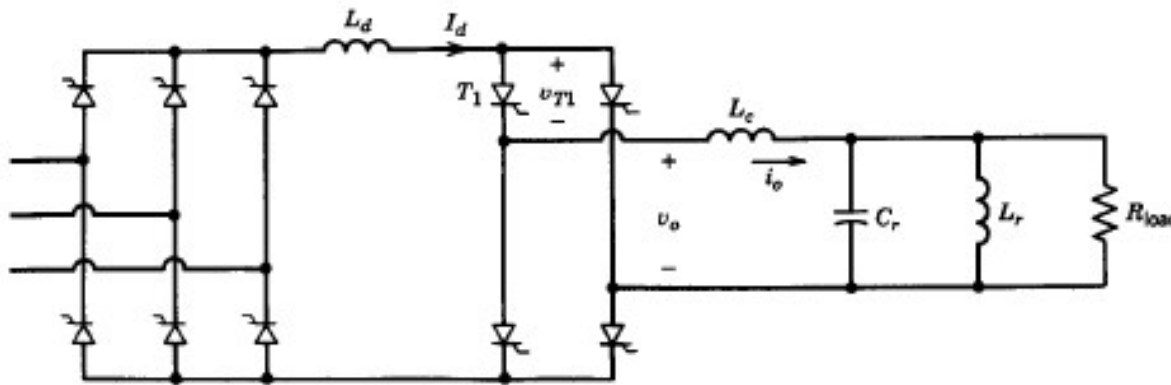


Convertitore cc/cc risonante a carico parallelo

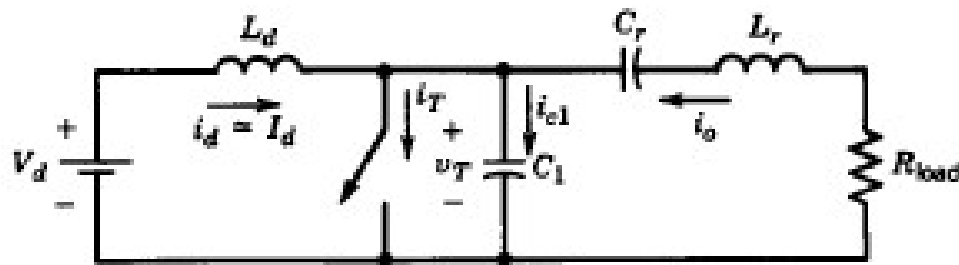
CONVERTITORI A CARICO RISONANTE



Convertitore cc/cc
risonante ibrido



Convertitore ca/ca a
corrente impressa a
risonanza parallelo

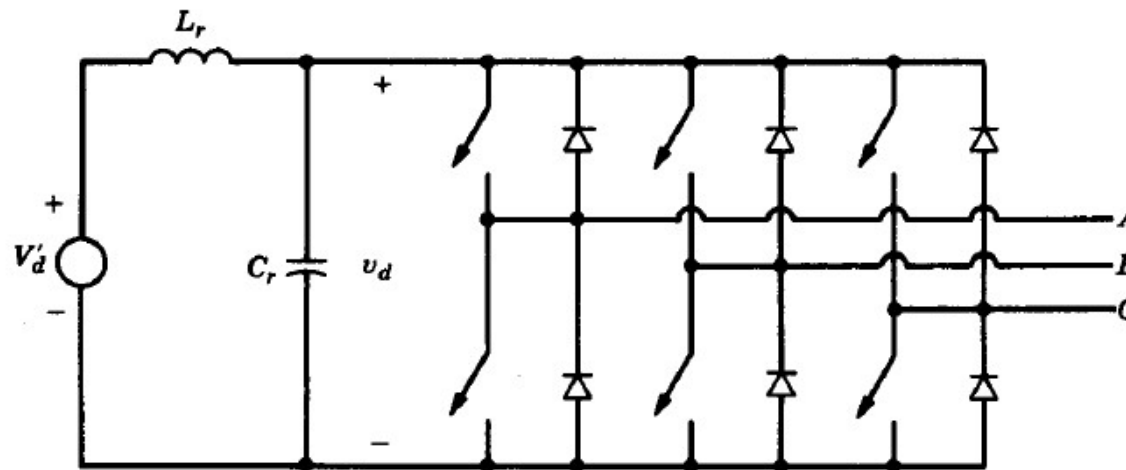


Convertitore risonante di classe E: il carico è alimentato mediante un circuito risonante serie accordato in modo preciso.

CONVERTITORI A DC-LINK RISONANTE

Nei convertitori cc/ca a commutazione forzata convenzionali la tensione di ingresso V_d ha ampiezza costante e la tensione di uscita alternata è ottenuta dalla commutazione degli interruttori comandati con la tecnica della PWM.

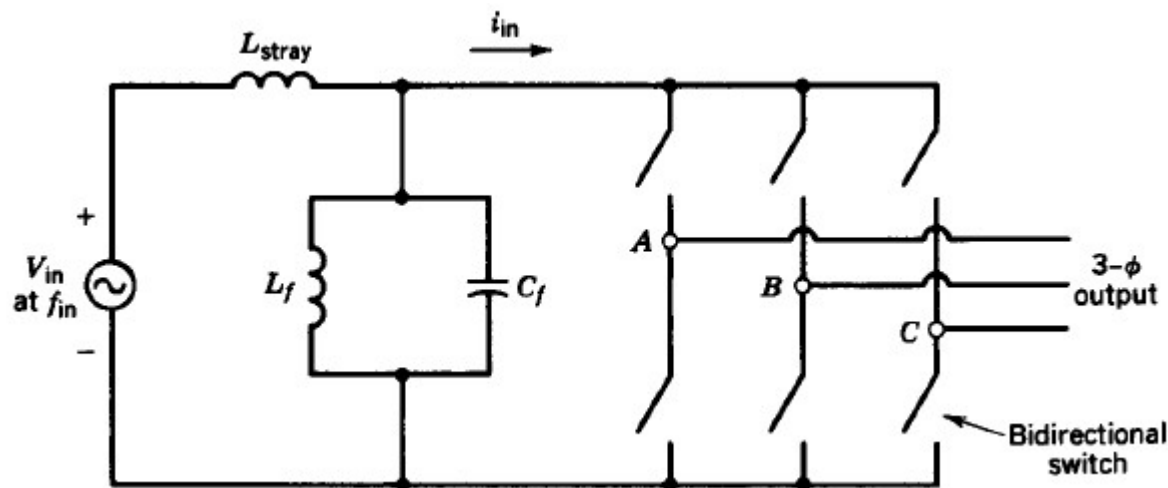
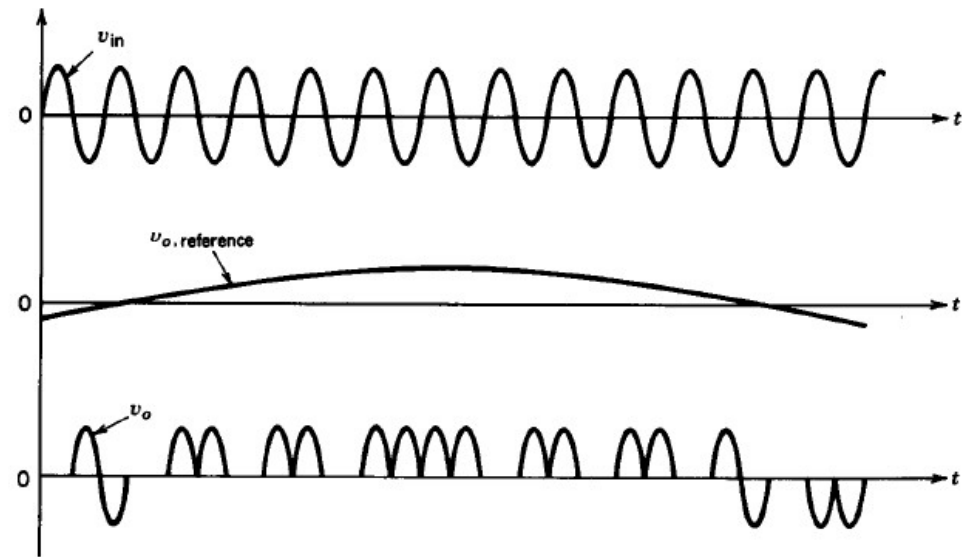
Nei convertitori a dc-link risonante, sfruttando la risonanza di un circuito LC, la tensione di ingresso viene fatta oscillare attorno al suo valore medio V_d così da rimanere a zero per un intervallo di tempo sufficiente a far sì che gli interruttori possano essere commutati a tensione nulla.



Convertitore cc/ca trifase a dc-link risonante: il circuito risonante $L_r C_r$ inserito fra la tensione continua di ingresso V_d' e il ponte trifase produce l'oscillazione di v_d fra zero e un valore di poco superiore al doppio di V_d' cosicché gli interruttori del ponte vengono commutati a tensione nulla.

CONVERTITORI CON INGRESSO IN ALTA FREQUENZA A INTEGRAZIONE DI SEMI-PERIODI

Se l'ingresso di un convertitore monofase o trifase è una tensione sinusoidale ad alta frequenza, allora, utilizzando interruttori bidirezionali, è possibile ottenere in uscita una tensione alternata in bassa frequenza di ampiezza e frequenza regolabili oppure continua di ampiezza regolabile, dove gli interruttori vengono commutati al passaggio per lo zero della tensione di ingresso.



Il filtro risonante parallelo $L_f C_f$ è accordato alla frequenza di ingresso in modo da non assorbire corrente dall'ingresso. Però C_f offre un percorso a bassa impedenza per tutte le altre frequenze di i_{in} che così non devono essere erogate da V_{in} .