

# Struttura dei convertitori risonanti

L'andamento della tensione ai capi di uno switch a semiconduttore in commutazione on/off presenta ritardi di accensione ( $t_{on}$ ) e di spegnimento ( $t_{off}$ ) rispetto alla tensione di comando. Tali intervalli sono dovuti a una componente interna ( $t_{d-on}$ ,  $t_{d-off}$ ) e al tempo di saturazione o di desaturazione del dispositivo stesso (fig. 1).

$$t_{on} = t_{d-on} + t_f$$

$$t_{off} = t_{d-off} + t_r$$

I valori relativi sono reperibili tra le caratteristiche dinamiche del componente, fornite dal costruttore.

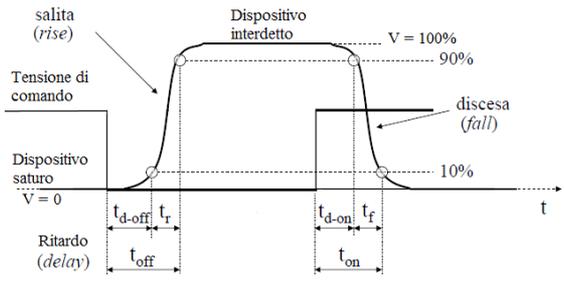


Fig. 1. Caratteristiche dinamiche di uno switch a semiconduttore.

Durante il passaggio tra le condizioni di saturazione e interdizione, il dispositivo lavora per un breve intervallo in zona lineare, con dissipazione interna di potenza (fig. 2).

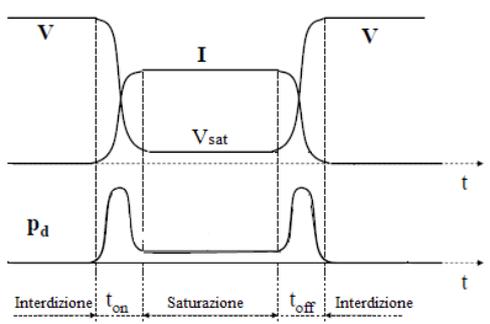


Fig. 2. Perdite di commutazione.

## Convertitori SRC

Nei convertitori risonanti serie il carico è connesso in serie con l'induttore e il condensatore del circuito risonante, perciò il convertitore non può funzionare in assenza di carico (salvo che questo sia accoppiato tramite trasformatore).

Un circuito RLC serie (fig. 3) presenta:

- frequenza di risonanza:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C}}$$

- impedenza caratteristica:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

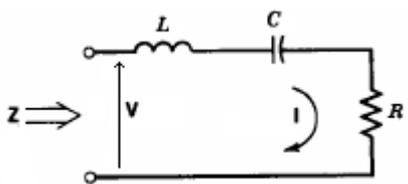


Fig. 3. Circuito risonante serie.

L'impedenza del circuito (Z) è puramente resistiva in corrispondenza di  $\omega = \omega_0$ , è capacitiva se  $\omega < \omega_0$ , è induttiva se  $\omega > \omega_0$  (fig. 4).

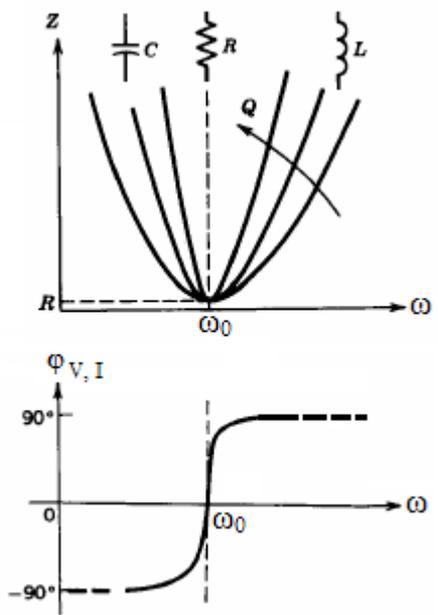


Fig. 4. Modulo dell'impedenza e fase al variare della pulsazione, per un circuito RLC serie.

Per indicare la prestazione di un convertitore risonante si utilizza il fattore qualità (Q) del circuito, un parametro senza dimensione che misura il livello di smorzamento presente nel circuito stesso, che

è definito dal rapporto tra la componente reattiva e la componente dissipativa.

$$Q = \frac{\omega_0 \cdot L}{R} = \frac{1}{\omega_0 \cdot C \cdot R} = \frac{Z_0}{R}$$

Un valore di Q più elevato identifica un circuito con una banda passante più stretta (fig. 4).

La struttura SRC più utilizzata è il **semiponte** (fig. 5), composto da due switch e due condensatori di capacità C/2, con l'induttore e la resistenza di carico inseriti sulla diagonale.

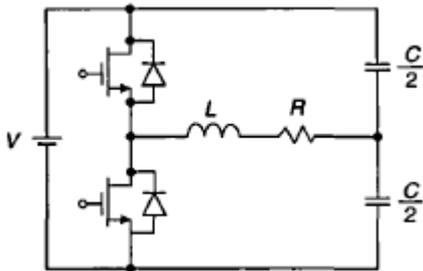


Fig. 5. Half-bridge series-resonant converter.

Si ottiene in questo modo un circuito RLC serie, commutato con dinamica massima  $\pm \frac{1}{2}V$ . Dal punto di vista dinamico, difatti, i due condensatori di valore C/2 risultano in parallelo, componendo un equivalente di valore C (fig. 6).

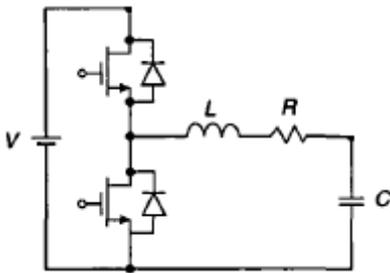


Fig. 6. Carico dinamico del semiponte.

Nota il valore desiderato della frequenza di risonanza ( $f_0$ ) si può ricavare il valore di C:

$$C = \frac{1}{4\pi^2 \cdot f_0^2 \cdot L}$$

Se il fattore di qualità del carico del circuito risonante è sufficientemente alto ( $QL > 3$ ) e la frequenza di switching dell'inverter si mantiene abbastanza prossima alla frequenza di risonanza  $f_0$ , lo stadio di uscita opera in modalità di conduzione continua,

con una tensione sinusoidale sul carico. In caso contrario tale tensione può differire notevolmente da una sinusoide.

Frequenza del convertitore e circuito di risonanza devono quindi risultare compatibili.

Se è richiesto l'isolamento tra ingresso e uscita, si accoppia il carico tramite un trasformatore di alta frequenza (fig. 7), molto più piccolo di un normale trasformatore, ottenendo un **circuito LLC**, in grado di funzionare in assenza di carico e su un'ampia gamma di tensioni di ingresso.

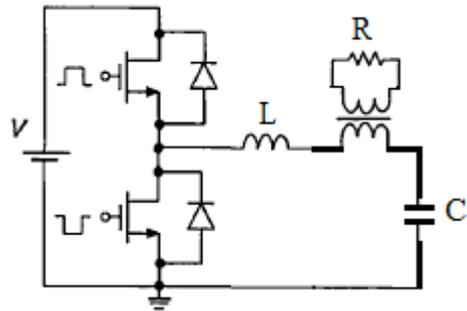


Fig. 7. Carico accoppiato tramite trasformatore.

Ponendo in cascata al convertitore risonante un raddrizzatore di alta frequenza, si ottiene un convertitore DC-DC (fig. 8).

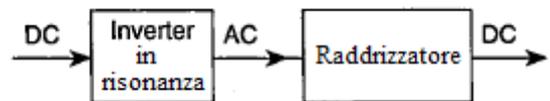


Fig. 8. Convertitore DC-DC risonante.

La potenza DC presente in ingresso viene prima convertita in AC mediante l'inverter e successivamente riportata in DC dal raddrizzatore (fig. 9).

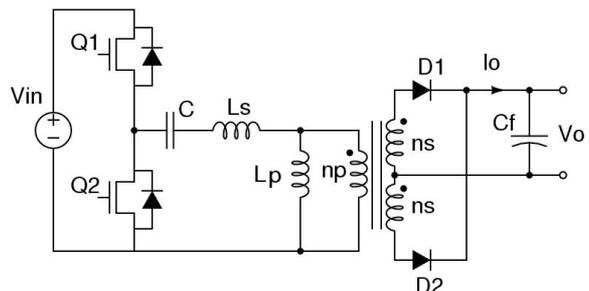


Fig. 9. Half bridge LLC resonant converter.

I tre componenti reattivi (C, Ls, Lp) del circuito in fig. 9 producono due possibili frequenze di risonanza, legate alle condizioni di carico. La prima frequenza

( $f_1$ ), la più alta, corrisponde alla condizione di carico presente sul secondario, con  $L_p = 0$  perché dinamicamente cortocircuitato dalla tensione costante presente dopo il filtro passa basso di uscita, e la seconda ( $f_2$ ), inferiore, con il carico sconnesso ( $L_p \neq 0$ ).

$$f_1 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_s \cdot C}}$$

$$f_2 = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L_s + L_p) \cdot C}}$$

La distanza tra le due che dipende dal rapporto  $L_p/L_s$ , tipicamente maggiore di 1.

**ESEMPIO 1**

Determinare la capacità dei due condensatori da inserire in un convertitore risonante a semiponte per un carico ferromagnetico di valori  $R = 3 \Omega$ ,  $L = 40 \mu\text{H}$ , che deve funzionare a 23 kHz. Determinare il fattore di qualità del carico.

**SOLUZIONE**

Dalla:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C}}$$

$$C = \frac{1}{4\pi^2 \cdot f_0^2 \cdot L} = \frac{1}{4\pi^2 \cdot (23 \cdot 10^3)^2 \cdot 40 \cdot 10^{-6}} = 1,2 \mu\text{F}$$

$$C/2 = 600 \text{ nF}$$

Fattore di qualità del carico:

$$Q = \frac{\omega_0 \cdot L}{R} = \frac{2\pi \cdot 23 \cdot 10^3 \cdot 40 \cdot 10^{-6}}{3} = 1,927$$

**Convertitori PRC**

Nei convertitori PRC il carico è connesso in parallelo al condensatore di risonanza (fig. 10).

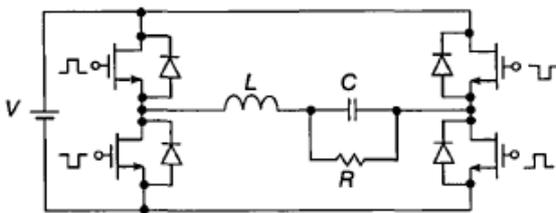


Fig. 10. Full-bridge parallel-resonant converter.

In un circuito RLC parallelo (fig. 11), l'impedenza del circuito è resistiva e massima in corrispondenza di  $\omega = \omega_0$ , induttiva per  $\omega < \omega_0$ , capacitiva per  $\omega > \omega_0$  (fig. 12).

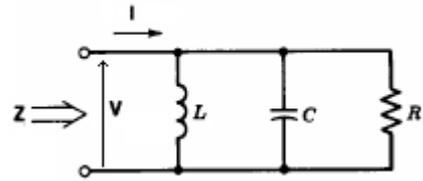


Fig. 11. Circuito risonante parallelo.

Anche in questo caso, frequenza del convertitore e circuito di risonanza devono risultare compatibili. Si consideri, per esempio, il circuito dinamico del convertitore a semiponte in fig. 13.

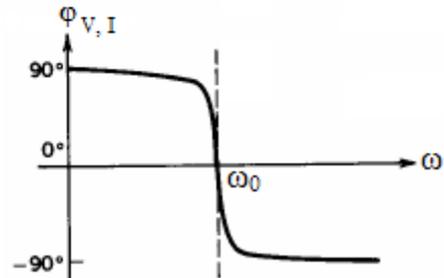
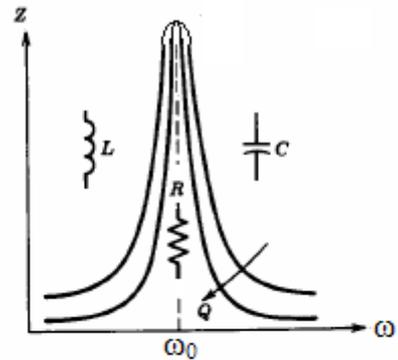


Fig. 12. Modulo dell'impedenza e fase al variare della pulsazione, per un circuito RLC parallelo.

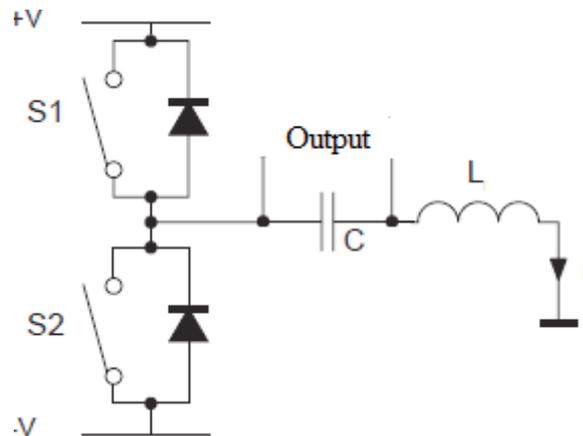


Fig. 13. Convertitore risonante a mezzo ponte con carico parallelo.

Se la frequenza di commutazione è minore della frequenza di risonanza, la corrente nel circuito presenta zone morte (fig. 14), che riducono l'efficienza del trasformatore.

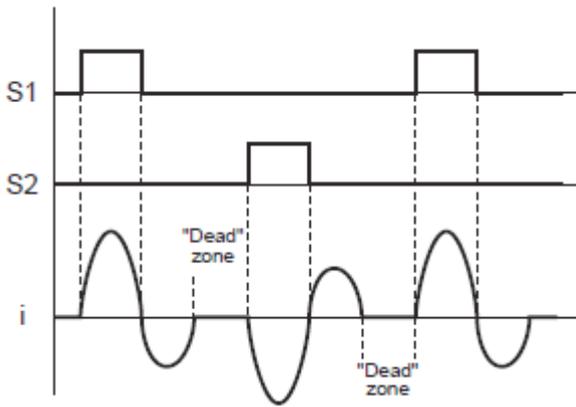


Fig. 14. Comportamento per  $f < f_0$ .

Incrementando la frequenza oltre il valore di risonanza, le sinusoidi si sovrappongono e la commutazione tra lo switch che chiude e il diodo che si interdice avviene in presenza di valori di corrente non nulli (fig. 15, p.to A), dovuti al tempo di recupero del diodo (recovery time), perciò con dissipazioni maggiori.

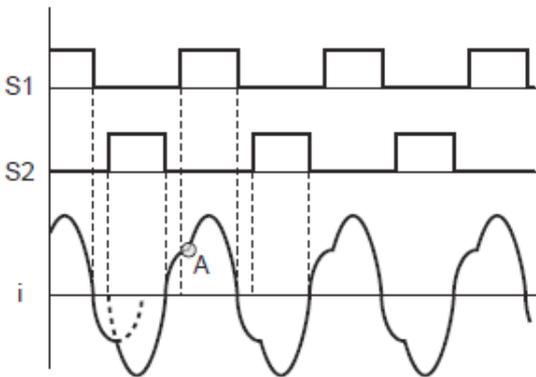


Fig. 15. Comportamento per  $f > f_0$ .

Ancora una volta, per ottenere un convertitore DC-DC basta porre in cascata un raddrizzatore di alta frequenza (fig. 16).

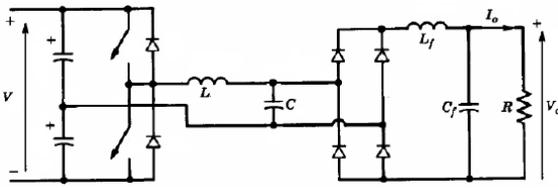


Fig. 16. Convertitore DC/DC soft-switching risonante parallelo.

### Cottura a induzione

In una cucina a induzione, ciascuna piastra contiene una bobina induttrice (fig. 17), alimentata con corrente alternata a frequenza 20÷100 kHz. Il campo magnetico generato attraversa il piano di cottura in vetroceramica e s'accoppia con il fondo della pentola speciale situata sul piano di cottura, dotata di fondo particolarmente ricco di materiale ferroso, inducendo una corrente parassita che sviluppa calore.

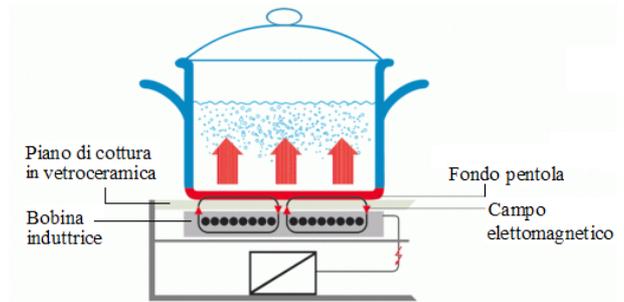


Fig. 17.

Per non avere campo disperso, la superficie della pentola deve coprire totalmente la zona di cottura.

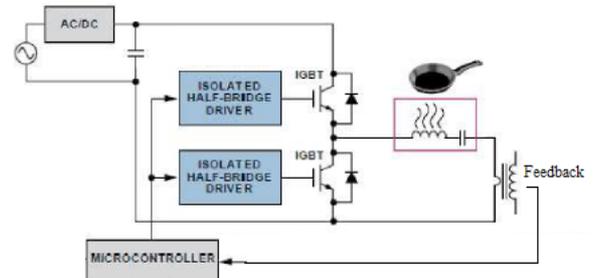


Fig. 18.

Per regolare la potenza trasferita, poiché il circuito elettrico oscillante sostiene il massimo trasferimento di potenza alla frequenza di risonanza, si interviene riducendo la frequenza, o inserendo e disinserendo periodicamente il campo magnetico (a intervalli di 2 secondi).