

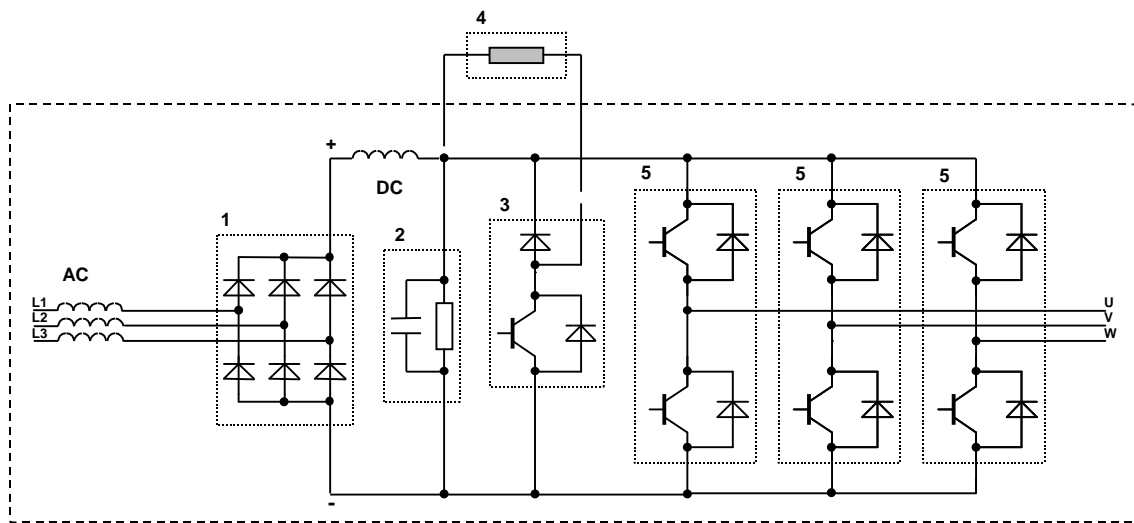
PROBLEMATICHE E FUTURO DEGLI INVERTER ALLA LUCE DELLE NUOVE NORMATIVE PER LE ARMONICHE A BASSA FREQUENZA.

(Vittorio Mazzoni

SMS Sistemi e MicroSistemi s.r.l.)

1) PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO DELL'INVERTER (schema a blocchi - fig. 1)

Com'è ormai noto a tutti, lo schema a blocchi di un inverter standard è quello riportato in figura, cioè la corrente di rete trifase alternata è convertita in corrente continua tramite un ponte trifase a diodi (1), livellata da un condensatore (2) e successivamente ritrasformata in alternata da un ponte ad IGBT con valori di frequenza e tensione variabili a piacere in un determinato range.



1 = Ponte a diodi trifase (convertitore CA/CC)

3 = Unità di frenatura interna

5 = Convertitore di tensione e frequenza (CC/CA)

DC = Induttanza lato tensione continua

2 = Condensatore

4 = Resistenza di frenatura

AC = Induttanza lato tensione alternata

Fig.1 – Schema a blocchi dell'inverter

Come già trattato in un precedente articolo, le commutazioni degli IGBT provocano problemi d'interferenza elettromagnetica EMI, mentre il ponte d'ingresso trifase provoca delle armoniche parassite in rete; infatti mentre la tensione d'ingresso è perfettamente sinusoidale, la corrente ha l'andamento mostrato in fig. 2.

La forma d'onda della corrente d'ingresso dipende dall'impedenza della linea, infatti inserendo in serie alla rete d'alimentazione un'impedenza aggiuntiva da 1,2 mH (caduta 2% a 20 A), si ottiene una corrente d'ingresso sensibilmente diversa (fig. 3).

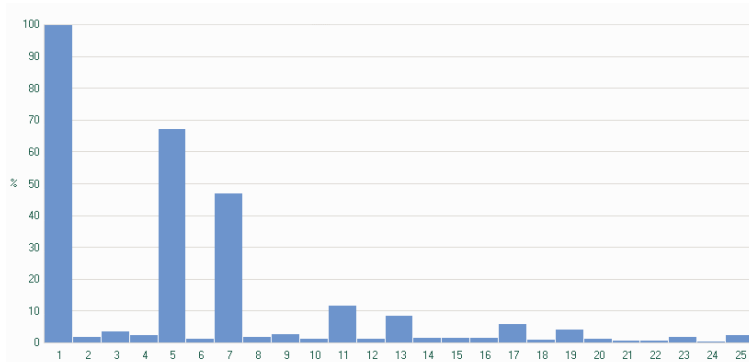
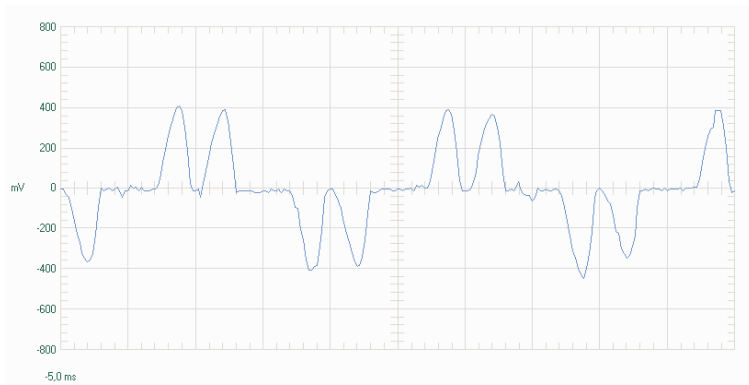


Fig.2 – Corrente in ingresso a pieno carico (20 A) senza induttanze (forma d'onda e spettro armoniche)

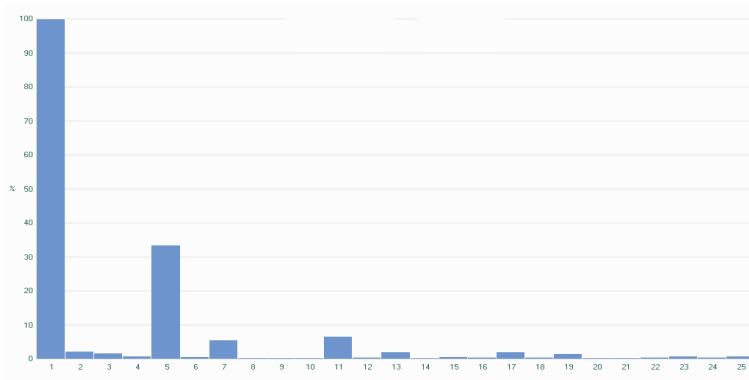
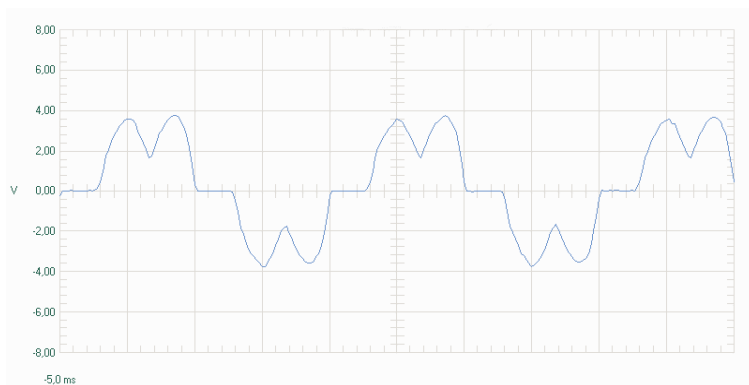


Fig.3 – Corrente in ingresso a pieno carico (20 A) con induttanza da 1,2 mH (forma d'onda e spettro armoniche)

Come si vede dalle figure 2 e 3, considerando che le prove sono state fatte nelle stesse condizioni di carico, il valore di picco della corrente d'ingresso è maggiore nel caso in cui non sia inserita l'induttanza in serie e, di conseguenza, le armoniche 5^a, 7^a, ecc. sono maggiori in questo caso.

La corrente armonica, generata dal sistema a ponte raddrizzatore trifase, presente con le armoniche di ordine $6xN \pm 1$ cioè 5^a e 7^a, 11^a e 13^a, 17^a e 19^a, ecc., non ha potenza, però è una corrente aggiuntiva nei cavi, a volte di valore uguale alla corrente a 50Hz, 1^o armonica o fondamentale, che provoca i seguenti inconvenienti:

- diminuzione del fattore di potenza;
- sovraccarico e surriscaldamento nei conduttori;
- distorsione della tensione di rete;
- cattivo funzionamento nei sistemi di misura;
- interferenze, a volte gravi, con altre apparecchiature sincronizzate con la rete;
- surriscaldamento dei condensatori di rifasamento e spianamento;
- possibilità di risonanze elettriche gravi per l'intero sistema.
- intervento intempestivo degli interruttori differenziali;
- aumento dell'energia consumata;
- invecchiamento accelerato degli isolanti;
- errori di misura nei contatori di energia.
- ecc...

2) **FATTORE DI POTENZA E $\cos\phi$**

2.1) **$\cos\phi$**

Se si alimenta un motore collegandolo direttamente alla rete di alimentazione, la tensione e la corrente sono entrambe sinusoidali, sfasate tra loro di un certo angolo ϕ che dipende dal tipo di motore e dal carico.

Con il motore a pieno carico normalmente l'angolo ϕ di sfasamento della corrente rispetto alla tensione è di $35 \div 40^\circ$, con un $\cos\phi$ di circa 0.8.

Come noto la potenza attiva assorbita dal motore è:

$$P(W) = \sqrt{3} * V * I * \cos\phi$$

per cui si nota che a parità di potenza, più il $\cos\phi$ è basso (angolo di sfasamento grande), più la corrente è alta. Un semplice condensatore di rifasamento inserito sulla linea quando funziona il motore, riesce a ridurre l'angolo di sfasamento, di conseguenza aumenta il $\cos\phi$ e si riduce la corrente richiesta alla linea. Non essendoci armoniche di ordine superiore, $\cos\phi$ e fattore di potenza coincidono.

2.2) **FATTORE DI POTENZA**

Quando si alimenta il motore tramite inverter, le cose cambiano radicalmente in quanto, come visto sopra, oltre alla componente fondamentale della corrente a 50Hz, compaiono varie armoniche di frequenza. In questo caso non si può parlare del $\cos\phi$, che è lo sfasamento tra tensione e corrente a 50Hz, ma di un fattore di potenza totale così definito:

$$\text{Fattore di potenza} = \frac{\text{Potenza Attiva}}{\text{Potenza Apparente}}$$

Dove per potenza attiva si intende la potenza assorbita a 50Hz, mentre la potenza apparente è la potenza totale assorbita tenendo conto della componente a 50Hz e di tutte le altre armoniche presenti.

Il calcolo della potenza attiva è:

$$P \text{ attiva} = \sqrt{3} * V * I_1 * \cos\phi$$

Mentre la potenza apparente è:

$$P \text{ apparente} = \sqrt{3} * V * I_{\text{eff}}$$

Dove:

V = tensione della rete di alimentazione (50Hz);

I₁ = corrente dell'armonica fondamentale (50Hz);

cosφ = sfasamento tra tensione e corrente a 50Hz;

I_{eff} = valore effettivo della corrente totale di ingresso tenendo conto di tutte le armoniche.

Il fattore di potenza sarà quindi:

$$\text{Fattore di potenza} = \frac{I_1 * \cos\phi}{I_{\text{eff}}}$$

Con I_{eff} Calcolata nel modo seguente:

$$I_{\text{eff}} = \sqrt{\sum_{n=0}^i I_n^2}$$

I_n = valore percentuale delle armoniche di corrente rispetto alla fondamentale a 50Hz.

Esempio: nella fig. 2 si vede che la 5^a armonica è circa il 70% della fondamentale per cui nella formula sarà 0.7, ecc.

Dalla formula sopra riportata si deduce che minori sono le armoniche, minore è la corrente efficace per cui maggiore è il fattore di potenza quindi, per rifasare, non servono i condensatori ma sono necessarie delle induttanze che abbattano il contenuto delle armoniche (vedi fig. 3).

Le induttanze possono essere montate sia in serie all'alimentazione in alternata, sia in serie al ramo intermedio in corrente continua (vedi fig. 1).

In un inverter standard senza induttanze, il contenuto totale delle armoniche va dal 70 al 100% della fondamentale. La variazione dipende sia dall'impedenza propria della linea d'alimentazione, sia dal carico richiesto in quell'istante al motore.

Le induttanze in ingresso svolgono quindi alcune funzioni fondamentali:

- Aumentano il fattore di potenza.
- Diminuiscono il contenuto delle armoniche.
- Diminuiscono la corrente di linea necessaria all'alimentazione dell'inverter.

Inoltre:

- Proteggono il ponte a diodi di ingresso contro le sovratensioni di rete, se montate sul ramo alternata.
- Allungano la vita dei condensatori di spianamento.
- Facilitano la protezione del motore.
- Riducono il sovraccarico degli eventuali condensatori di rifasamento.
- Proteggono l'inverter quando è installato vicino a trasformatori di grande potenza (10 volte maggiore della potenza dell'inverter).
- Rendono più "pulita" la rete di alimentazione.

I grafici nelle figure 4 e 5 mostrano l'andamento del contenuto delle armoniche e del fattore di potenza, al variare dell'impedenza di ingresso dell'inverter che alimenta un motore a pieno carico.

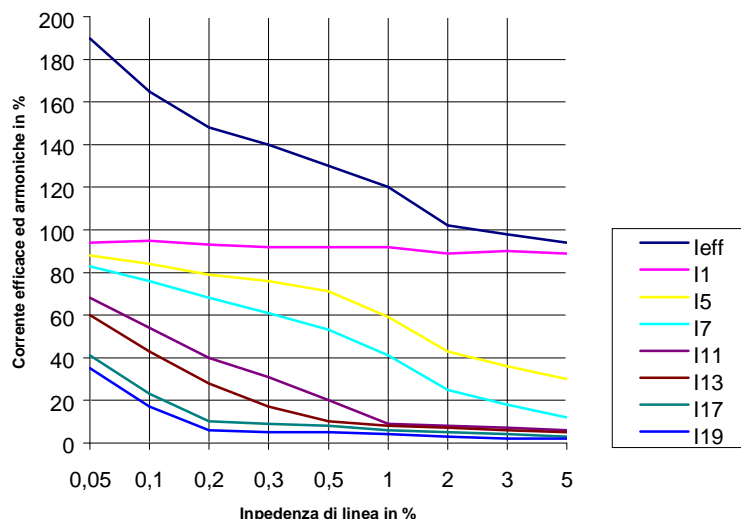


Fig.4 – Correnti armoniche e corrente efficace dell'inverter in funzione dell'induttanza di linea con motore a pieno carico.

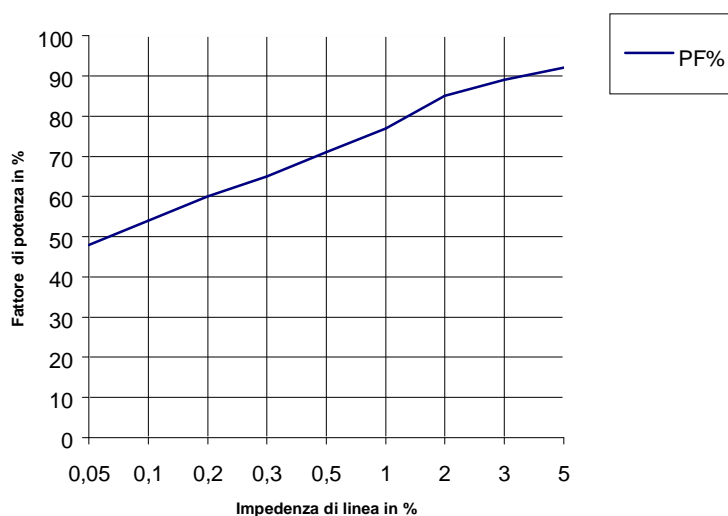


Fig.5 –Fattore di potenza dell'inverter in funzione dell'impedenza di linea con motore a pieno carico.

Come si può notare dal grafico, un'induttanza del 3% porta il fattore di potenza al valore di circa 0.9, valore minimo richiesto dalle principali società che distribuiscono l'energia elettrica; considerando però che più l'induttanza è alta, maggiore è la caduta di tensione di linea, normalmente viene usata una induttanza del 2% sia per motivi di costo che di caduta di tensione. Un'induttanza inserita sul ramo in continua (in uscita dal ponte a diodi) produce gli stessi effetti, tuttavia si preferisce usare un'induttanza in alternata in quanto meno costosa.

3) LIMITI DI UN INVERTER E NUOVE POSSIBILITA'

3.1) LIMITI DI UN INVERTER TRADIZIONALE

Il convertitore trifase di ingresso a ponte di diodi, è sicuramente una soluzione robusta ed economica, tuttavia presenta alcuni inconvenienti:

- Elevato contenuto armonico e di conseguenza fattore di potenza basso.
- Flusso di energia unidirezionale (cioè dalla rete all'inverter).
- Tensione di uscita limitata, che diminuisce, rispetto alla rete, quando sono inserite le impedenze di ingresso
- Motori con tensione di avvolgimento diversa dallo standard, $320 \div 350V$ anziché $400V$ per compensare le cadute sulle induttanze ed ottenere il massimo della coppia in fase di accelerazione.

Nella maggior parte delle applicazioni non ci sono particolari problemi (es. nella regolazione della velocità di pompe, compressori, ventilatori, ecc.).

Nelle applicazioni del sollevamento come gru e ascensori, cioè quando è richiesto anche il funzionamento di freno, in quanto il motore, trascinato dal carico, restituisce energia (ad esempio ascensore con cabina vuota in marcia salita) l'energia generata dal motore deve essere dissipata da un resistore, comandato da un chopper, alimentato automaticamente dall'inverter quando la tensione del ramo in corrente continua supera un determinato valore di soglia.

Tale soluzione diventa precaria quando sono in gioco grosse potenze, oppure corse molto lunghe. A titolo di esempio, notiamo che per un impianto con motore da $22kW$ $400V$, 70 m di corsa e velocità 1.6 m/s, per frenare la corsa della cabina vuota in salita occorre una resistenza di circa 15Ω con potenza $6kW$, che rimane inserita per il tempo di corsa che è circa 45 secondi. Inoltre durante la fase di rallentamento e arrivo al piano si ha un picco di potenza di $10 \div 12kW$ con conseguente calore elevato da dissipare in locale macchina.

3.2) INVERTER A 4 QUADRANTI O RIGENERATIVO

Un regolatore si dice a << quattro quadranti >> quando è in grado di generare e ricevere energia da e verso il motore e da e verso la rete in entrambi i sensi di marcia; con un inverter tradizionale questo non è possibile.

Con alcuni accorgimenti si può rendere rigenerativo un inverter, cioè scaricare l'energia generata dal motore sulla rete anziché su un resistore. I metodi oggi usati sono 2:

- A) Usare come convertitore d'ingresso un doppio ponte total-controllato a SCR anziché a diodi.
- B) Usare come convertitore d'ingresso un ponte attivo ad IGBT.

Il ponte a SCR è una soluzione robusta ed economica che però presenta i seguenti inconvenienti:

- Contenuto armonico lato rete peggiore di un normale ponte a diodi.
- Il funzionamento rigenerativo richiede un autotrasformatore oppure un motore a tensione ridotta (max. $300V$ per una rete $400V$) di conseguenza un motore con avvolgimento speciale.
- Nel funzionamento rigenerativo l'immunità ai disturbi verso rete è critica, per cui è necessario usare fusibili extrarapidi di protezione.

Il ponte ad IGBT (vedi fig. 6) con controllo vettoriale e modulazione PWM, supera tutti gli inconvenienti del ponte a SCR o a diodi e presenta i seguenti vantaggi:

- Funzionamento rigenerativo e recupero di energia in rete senza autotrasformatore né motore speciale.
- Contenuto armonico della corrente scambiata con la rete inferiore al 4% che consente la conformità alle norme più severe sul contenuto delle armoniche e quindi la corrente assorbita e ceduta alla rete è praticamente sinusoidale (vedi fig. 7).

- L'alta dinamica di regolazione e il controllo ad anello chiuso della tensione sul ramo a corrente continua consentono di compensare sia lo sbilanciamento della tensione di rete che l'abbassamento della stessa.
- Il convertitore funziona con fattore di potenza unitario e quindi la rete « vede » minore corrente a parità di potenza, ma può funzionare anche come fattore di potenza capacitivo o reattivo consentendo il rifasamento d'altri carichi.
- La tensione del ramo in continua può essere regolata a valori superiori a quelli che si hanno con un normale ponte a diodi, in altri termini si può alimentare un motore a 500V partendo da una alimentazione di rete di 400V, con conseguente maggiore possibilità di correzioni dinamiche del controllo e minori correnti, in certi casi si può addirittura aumentare la potenza del motore.
- Possibilità di usare il sistema come filtro attivo, cioè in grado di eliminare le principali armoniche di disturbo di una rete di alimentazione in bassa tensione (3^a, 5^a, 7^a).
- Il basso contenuto armonico garantisce l'assoluta immunità di sistemi complessi alle pericolose risonanze che, inevitabilmente, sono presenti nei sistemi con molti inverter e con impianti di rifasamento a condensatori.

Nel campo ascensoristico, l'inverter con convertitore d'ingresso ad IGBT offre tanti vantaggi, il maggiore costo d'acquisto (unico svantaggio), è facilmente ammortizzabile specie negli impianti con grandi portate, grandi corse e in batteria, con argani ad alto rendimento o Gearless; infatti l'energia generata da un motore in frenatura viene utilizzata dagli altri impianti o dalle altre utenze collegate allo stesso contatore d'energia elettrica. Inoltre, adottando la soluzione come in fig. 6 (unico ponte di ingresso per diversi ascensori), la differenza di costo iniziale rispetto a tanti singoli inverter tradizionali è estremamente contenuta.

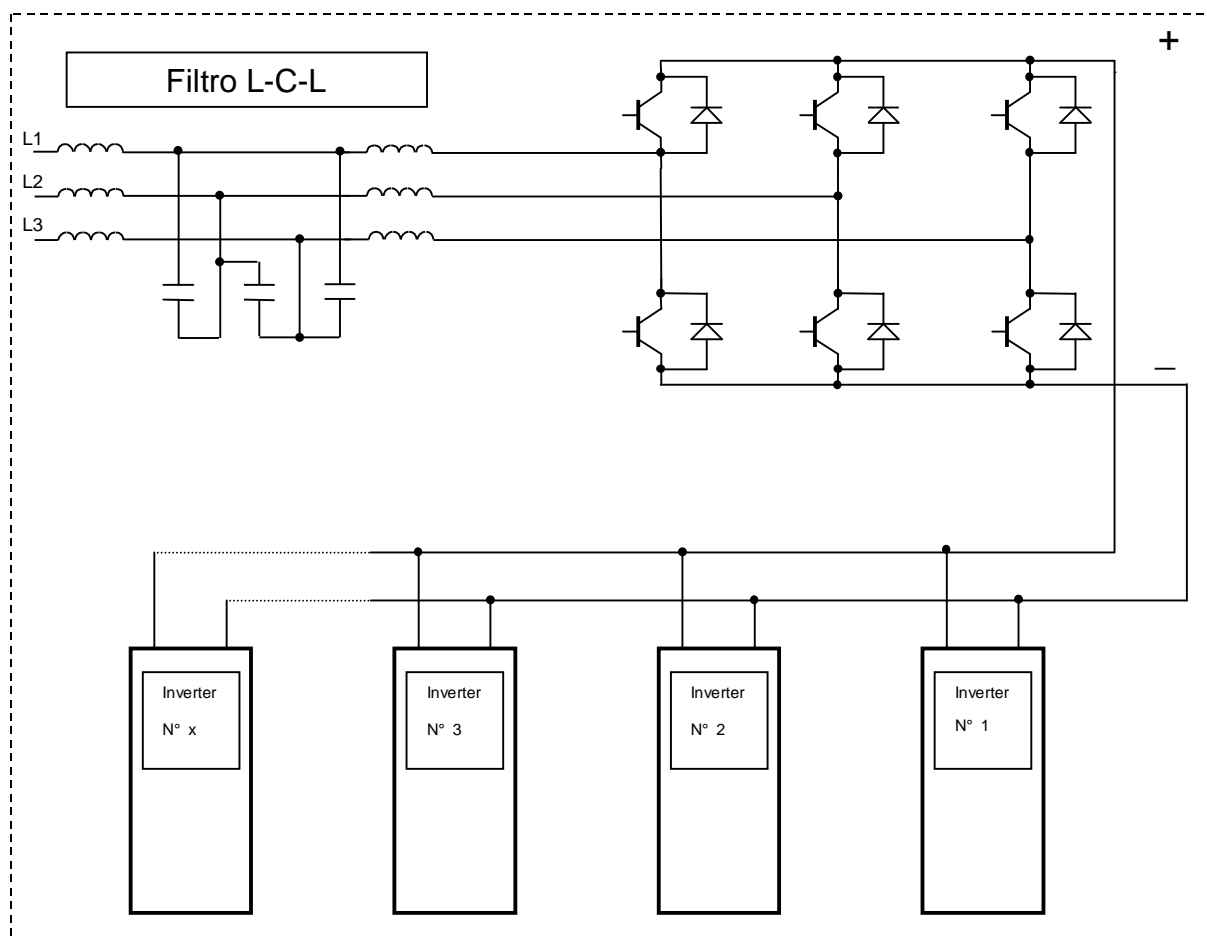


Fig.6 – Ponte attivo a IGBT dell' inverter rigenerativo

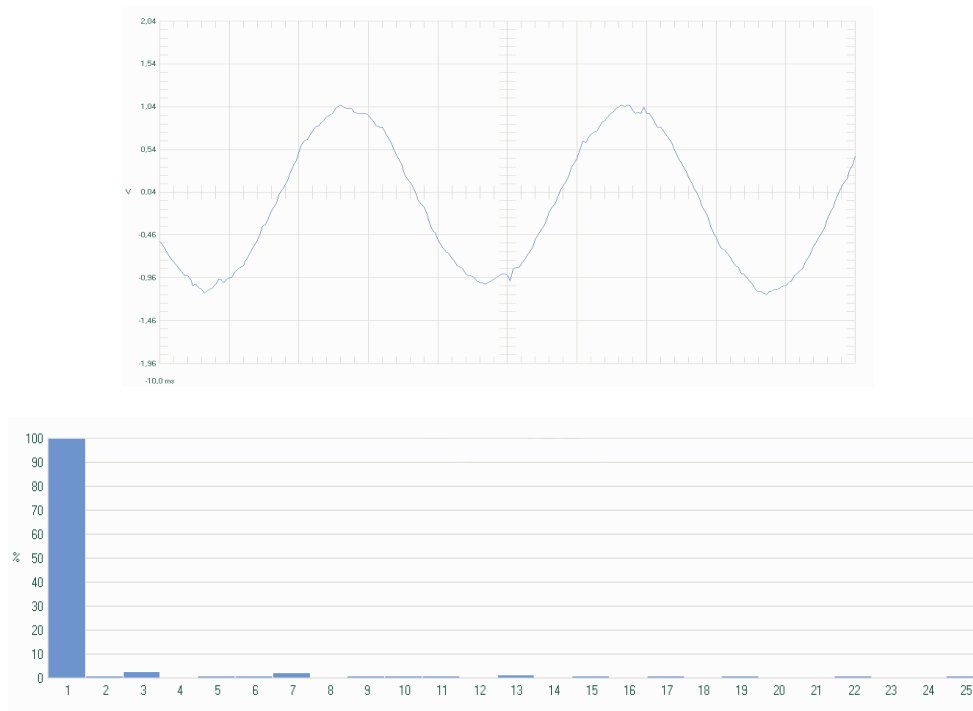


Fig.7– Corrente assorbita dalla linea con inverter rigenerativo (forma d'onda e spettro delle armoniche)

Oltre al risparmio energetico, che rappresenta il beneficio immediato per l'utente, occorre notare che a livello normativo si stanno prendendo provvedimenti per contenere le armoniche e i loro negativi effetti sul sistema globale della rete elettrica . Già è in vigore la norma CEI-EN61000-3-2 per correnti fino a 16A, prossimamente andrà in vigore la norma CEI-EN61000-3-4 per correnti maggiori di 16 A . A tal proposito si noti che nel progetto di revisione della norma EN12015 (prEN12015 PROJET REVISION.8) la 5^a armonica dovrà essere minore del 30% della fondamentale; la 7^a armonica dovrà essere minore del 18% della fondamentale; la 11^a armonica dovrà essere minore del 13% della fondamentale ecc., mentre la distorsione totale delle armoniche definita dalla formula:

$$THD = \sqrt{\sum_{n=2}^{40} \left(\frac{I_n}{I_1}\right)^2}$$

cioè la sommatoria dei valori efficaci delle varie armoniche I_n riferiti al valore efficace della fondamentale I_1 deve risultare minore del 35%. Con questa norma non sarà più possibile l'installazione di inverter tradizionali.

La conformità alla normativa si otterrà soltanto in 2 modi:

- con inverter tradizionali e grosse induttanze di ingresso (sul lato alternata o continua del ponte);
- con inverter rigenerativi.

Quest'ultima soluzione è la migliore risposta a queste problematiche in quanto il contenuto massimo delle armoniche è il 4%, di gran lunga inferiore a quello richiesto dalla normativa.

Già ora diverse industrie installano inverter rigenerativi non per il risparmio energetico, ma unicamente per la <<pulizia >> della corrente assorbita che elimina in modo globale qualunque problema di risonanza elettrica con altre apparecchiature alimentate dalla stessa rete.

4) FUTURO DEGLI INVERTER NEL CAMPO ASCENSORISTICO

L'evolversi continuo delle normative e della tecnica ha già portato una grande rivoluzione nel mercato ascensoristico, basti pensare che i vecchi sistemi di regolazione di velocità dei motori (ACVV per motori in alternata, Ward-Leonard o convertitori statici per motori corrente continua) sono stati completamente sostituiti dai regolatori VVVF tradizionali; le nuove normative prEN12015, quando entreranno in vigore, imporranno l'uso di VVVF diversi dagli attuali per aver minore inquinamento sia a radiofrequenza che sulla rete di alimentazione. Se a tutto questo si aggiunge che un sempre maggior numero di clienti richiede la manovra di emergenza per il ritorno della cabina al piano in caso di black-out, si può ipotizzare che tra qualche anno gli inverter avranno:

- Contenuto armonico totale pari a circa il 30% del contenuto armonico attuale.
- Capacità rigenerative in modo da rendere minimo sia il consumo energetico che il contenuto armonico.
- Possibilità di funzionamento in caso di black-out con alimentazione ausiliaria da batterie in tampone.
- Riduzione drastica degli spike di tensione di uscita che attualmente provocano stress ed invecchiamento precoce degli isolamenti dei motori.
- Possibilità di funzionare sia come regolatori VVVF ad anello aperto o chiuso che come regolatori di motori a magneti permanenti (brushless).

Anticipando i tempi, già oggi è possibile reperire sul mercato ascensoristico inverter con software e hardware particolari che, oltre a garantire un grande comfort di marcia, non "inquinano" la rete, consumano poco e sono in grado di riportare, manualmente od automaticamente, la cabina al piano desiderato in caso di black-out.

BIBLIOGRAFIA

VACON: Frequency converter.

Giuseppe PRIORA: Causa ed effetti delle correnti armoniche.

FUJI INVERTER : Harmonic of inverter power line (input)