

Guida alle armoniche negli azionamenti in c.a.



1. Introduzione	5
2. Nozioni di base sul fenomeno delle armoniche	6
3. Fonti ed effetti delle distorsioni armoniche ...	8
4. Un esempio di calcolo di distorsione armonica	9
4.1 Calcolo delle impedenze a livello della sorgente e della potenza di cortocircuito	9
4.2 Calcolo dell'effetto della commutazione	10
4.3 Tabella: Coefficienti di correzione	10
4.4 Calcolo della distorsione di tensione	10
4.5 Tabella: Correnti e tensioni armoniche in corrispondenza del lato a 22 kV	11
4.6 Tabella: Correnti e tensioni armoniche in corrispondenza del lato a 415 V	11
5. Le normative che stabiliscono i limiti delle armoniche	12
5.1 EN61800-3 (IEC 1800-3) Sistemi di azionamento elettrico a velocità variabile	12
5.2 IEC1000-2-2, Compatibilità elettromagnetica (EMC)	13
5.3 IEC1000-2-4, Compatibilità elettromagnetica (EMC)	13
5.4 IEC1000-3-2, Compatibilità elettromagnetica (EMC)	13
5.5 IEC1000-3-4, Compatibilità elettromagnetica (EMC)	13
5.6 IEEE 519, IEEE Procedure consigliate e requisiti per il controllo delle armoniche negli azionamenti elettrici	14
6. Valutazione delle armoniche	16
7. Come ridurre le armoniche attraverso modifiche strutturali del sistema di azionamento in c.a.	17
7.1 Fattori presenti nell'azionamento in c.a. con effetto sulle armoniche	17
7.2 Tabella: Elenco dei vari fattori e dei relativi effetti	18
7.3 Utilizzo di un raddrizzatore a diodi a 6 impulsi	18
7.4 Utilizzo di un raddrizzatore a diodi a 24 impulsi e a 12 impulsi	19
7.5 Utilizzo di un raddrizzatore a tiristori con controllo di fase	19

7.6	Utilizzo di ponti IGBT	20
7.7	Utilizzo di un'induttanza maggiore in c.a. o in c.c.	21
8.	Altri metodi di riduzione delle armoniche	24
8.1	Filtro passivo tarato a braccio singolo	24
8.2	Filtro passivo tarato a bracci multipli	24
8.3	Filtro esterno attivo	25
9.	Attenuazione delle armoniche: Riepilogo	26
9.1	Raddrizzatore a 6 impulsi senza induttore	26
9.2	Raddrizzatore a 6 impulsi con induttore	26
9.3	Raddrizzatore a 12 impulsi con trasformatore polycon	26
9.4	Trasformatore a 12 impulsi con avvolgimento doppio	26
9.5	Raddrizzatore a 24 impulsi	26
9.6	Raddrizzatore attivo IGBT	27
10.	Definizioni	28
11.	Indice analitico	30

Capitolo 1 - Introduzione

Generalità

La presente guida si aggiunge alla serie di guide tecniche ABB e si occupa del problema delle distorsioni armoniche, delle relative fonti e dei possibili effetti, oltre che del calcolo e della valutazione di tali distorsioni. E' stata data particolare attenzione ai metodi di riduzione delle armoniche negli azionamenti in c.a.

Capitolo 2 - Nozioni di base sul fenomeno delle armoniche

Le correnti e le tensioni armoniche sono determinate da carichi non lineari collegati al sistema di distribuzione di potenza. La distorsione armonica è una forma di inquinamento dell'impianto elettrico che può determinare problemi se la somma delle correnti armoniche supera certi limiti.

Tutti i convertitori di potenza elettronici utilizzati nei sistemi elettronici di vario tipo, possono disturbare i disturbi da armoniche mediante l'introduzione di correnti armoniche direttamente nella griglia. La Figura 2.1 mostra come le armoniche di corrente (i_h) presenti nella corrente di ingresso (i_s) di un convertitore elettronico di potenza possono modificare la tensione di alimentazione (u_t).

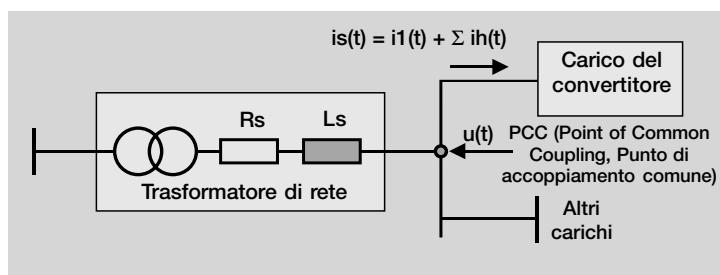


Figura 2.1 Impianto dotato di carico del convertitore, trasformatore di rete e altri carichi

La corrente di linea di un raddrizzatore può essere calcolata a partire dalla corrente di uscita diretta utilizzando la seguente formula.

$$I_1 = \sqrt{\frac{2}{3}} * I_d, \text{ dove}$$

I_1 = la corrente di linea fondamentale e

I_d = uscita di corrente diretta dal raddrizzatore.

Nel caso teorico in cui la corrente di uscita sia calcolata come corrente pulita in c.c., le frequenze della corrente armonica di un raddrizzatore trifase a 6 impulsi sono uguali a n volte la frequenza fondamentale (50 o 60 Hz). I numeri di ordine n sono calcolati con la formula seguente:

$$n = 6k \pm 1, \text{ dove } k = 1, 2, 3, \dots$$

I valori rms dei componenti delle armoniche sono:

$$I_{ni} = \frac{I_1}{n}$$

mentre i componenti delle armoniche sono evidenziati nella Figura 2.2.

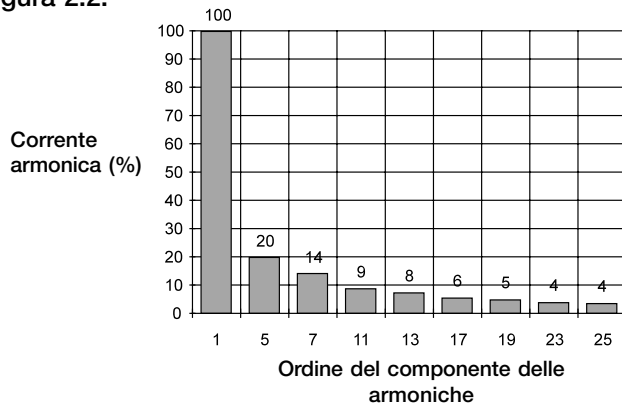


Figura 2.2 Contenuto di armoniche in una corrente rettangolare emessa da un raddrizzatore a 6 impulsi

La Figura 2.3 mostra il principio per il quale i componenti delle armoniche vengono aggiunti alla corrente fondamentale, dove viene mostrata solo la 5ª armonica.

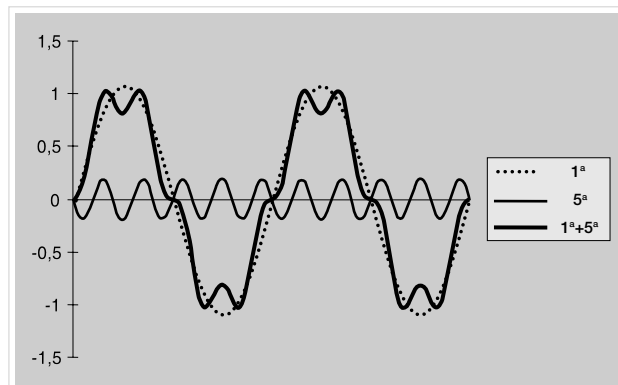


Figura 2.3 La corrente totale come somma della corrente fondamentale e della 5ª armonica

Capitolo 3 - Fonti ed effetti delle distorsioni armoniche

Tra i carichi non lineari più comuni vi sono gli avviatori dei motori, gli azionamenti a velocità variabile, i computer e altre apparecchiature elettroniche, l'illuminazione elettronica, i sistemi di saldatura e i gruppi di continuità.

Gli effetti delle armoniche possono essere il surriscaldamento di trasformatori, cavi, motori, generatori e condensatori collegati alla stessa alimentazione di potenza dei dispositivi che generano le armoniche. Si possono verificare fenomeni di sfarfallio dei display elettronici e dell'illuminazione, lo scatto di interruttori, guasti ai computer ed errori di lettura degli indicatori di misura.

Se la causa di questi sintomi non è nota, è opportuno ricercare la presenza di distorsioni armoniche del sistema di distribuzione elettrica dell'impianto. Gli effetti possono manifestarsi prima a livello dell'impianto dell'utente che nel sistema di erogazione dell'energia elettrica. La presente Guida tecnica è stata pubblicata per facilitare i clienti nella comprensione dei problemi di armoniche che possono presentarsi, per consentire loro di assicurarsi che i livelli di distorsione armonica non siano eccessivi.

Capitolo 4 - Un esempio di calcolo di distorsione armonica

Le correnti armoniche causano distorsioni a livello della tensione di linea. In linea di principio, le armoniche di tensione possono essere calcolate in qualsiasi punto della rete se le correnti armoniche e le impedenze della sorgente corrispondente sono note. I diagrammi circuitali nella Figura 4.1 mostrano la rete che alimenta il convertitore e altri componenti essenziali dell'installazione. I dati elettrici rilevati dall'installazione necessari al calcolo delle armoniche sono forniti all'interno della figura. Le fasi di calcolo e i risultati sono riportati a titolo di esempio nelle sezioni da 4.1 a 4.6.

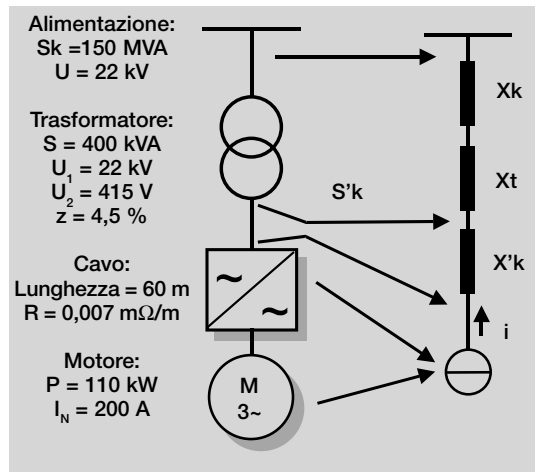


Figura 4.1 La rete di alimentazione di un convertitore di frequenza sulla sinistra e il diagramma equivalente sulla destra

4.1 Calcolo delle impedenze a livello della sorgente e della potenza di cortocircuito

L'impedenza di cortocircuito dell'alimentazione è ridotta sul lato a 415 V:

$$X_k = \frac{(415V)^2}{150MVA} = 1,15m\Omega$$

Impedenza di cortocircuito del trasformatore di alimentazione:

$$X_t = \frac{4,5}{100} * \frac{(415V)^2}{400kVA} = 19,4m\Omega$$

L'impedenza dei cavi di alimentazione tra il trasformatore e il convertitore:

$$X'_k = 60 * 0,007m\Omega = 0,42m\Omega$$

La potenza di cortocircuito in corrispondenza dei terminali del convertitore:

$$S'_k = \frac{(415V)^2}{X_k + X_t + X'_k} = 8,2MVA$$

4.2 Calcolo dell'effetto della commutazione

Effetto di commutazione con un raddrizzatore a 6 impulsi:

$$\mu_0 = \arccos\left(1 - \frac{\sqrt{3} * I * U}{S_k'}\right) = \arccos\left(1 - \frac{\sqrt{3} * 200A * 415V}{8,2MVA}\right) = 11^\circ$$

Effetto di commutazione con un raddrizzatore a 12 impulsi:

$$\mu_0 = \arccos\left(1 - \frac{\sqrt{3} * I * U}{S_k'}\right) = \arccos\left(1 - \frac{\sqrt{3} * 100A * 415V}{8,2MVA}\right) = 8^\circ$$

I coefficienti di correzione della commutazione sono determinati dagli angoli. Essi vengono utilizzati per moltiplicare le armoniche teoriche.

4.3 Tabella: Coefficienti di correzione

n	Coefficienti di correzione raddrizzatore a 6 impulsi	Coefficienti di correzione raddrizzatore a 12 impulsi
5	0,98	0,99
7	0,96	0,97
11	0,90	0,93
13	0,86	0,90
17	0,78	0,87
19	0,72	0,93
23	0,62	0,77
25	0,52	0,73

4.4 Calcolo della distorsione di tensione

La corrente armonica I_n causa una componente della tensione armonica U_n proporzionale alla tensione di linea fondamentale U_1 in corrispondenza delle sbarre di alimentazione del convertitore.

$$\frac{U_n}{U_1} = \frac{\sqrt{3} * I_n * U_1 * n}{S_k'}$$

La distorsione armonica totale può essere stimata calcolando la somma di un numero sufficiente di armoniche (di solito 25 o 40).

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2}}{U_1}$$

**4.5 Tabella:
Correnti e
tensioni
armoniche in
corrispondenza
del lato a 22 kV:**

$$I_1 = 415 \text{ V}/22 \text{ kV} * 200 \text{ A} = 3,77 \text{ A}$$

	ponte a 6 impulsi			ponte a 12 impulsi	
n	I_n/I_1 (%)	U_n/U_1 (%)	n	I_n/I_1 (%)	U_n/U_1 (%)
5	19,60	0,09	5		
7	13,71	0,09	7		
11	8,18	0,09	11	8,45	0,09
13	6,62	0,08	13	6,92	0,09
17	4,59	0,07	17		
19	3,79	0,07	19		
23	2,70	0,06	23	3,35	0,07
25	2,24	0,05	25	2,92	0,07
				<p>ponte a 6 impulsi</p>	<p>ponte a 12 impulsi</p>
	Distorsione di corrente totale	27,3 %		11,80 %	
	Distorsione di tensione totale	0,22 %		0,16 %	

**4.6 Tabella:
Correnti e
tensioni
armoniche in
corrispondenza
del lato a
415 V:**

$$I_1 = 200 \text{ A}$$

	ponte a 6 impulsi			ponte a 12 impulsi	
n	I_n/I_1 (%)	U_n/U_1 (%)	n	I_n/I_1 (%)	U_n/U_1 (%)
5	19,60	1,71	5		
7	13,71	1,68	7		
11	8,18	1,57	11	8,45	1,63
13	6,62	1,50	13	6,92	1,57
17	4,59	1,36	17		
19	3,79	1,26	19		
23	2,70	1,08	23	3,35	1,35
25	2,24	0,98	25	2,92	1,28
				<p>ponte a 6 impulsi</p>	<p>ponte a 12 impulsi</p>
	Distorsione di corrente totale	27,3 %		11,80 %	
	Distorsione di tensione totale	4,01 %		2,93 %	

Capitolo 5 - Le normative che stabiliscono i limiti delle armoniche

Segue una descrizione delle normative più comuni - a livello nazionale e internazionale - che stabiliscono limiti per le armoniche.

La Figura 5.1 funge da esempio dei limiti per le distorsioni armoniche.

5.1 EN61800-3 (IEC 1800-3) Sistemi di azionamento elettrico a velocità variabile

Parte 3: Norma di prodotto EMC comprendente metodi di prova specifici

I paesi dello Spazio Economico Europeo (SEE) hanno concordato alcuni requisiti normativi minimi comuni al fine di assicurare la libera circolazione dei prodotti all'interno del SEE. La marcatura CE indica che il prodotto è conforme alle direttive valide per lo stesso. Le direttive stabiliscono i principi da seguire. Le normative specificano i requisiti che devono essere assicurati.

La norma di prodotto EMC per gli azionamenti elettrici a velocità variabile è la norma EN61800-3. La conformità ai requisiti di tale norma è la condizione minima perché sia consentita la libera circolazione di convertitori elettronici di potenza all'interno del SEE.

La norma EN61800-3 stabilisce che il produttore è tenuto a fornire, nell'ambito della documentazione dell'azionamento elettrico su richiesta, il livello delle armoniche di corrente, alle condizioni nominali, in percentuale sulla corrente fondamentale nominale in corrispondenza della porta di potenza. I valori di riferimento dovranno essere calcolati per ciascun ordine almeno fino alla 25^a. È opportuno valutare la distorsione armonica di corrente totale (valori fino al 40 compreso), e la relativa distorsione armonica parziale del componente ad alta frequenza (valori dal 14 al 40 compresi). Per questi calcoli standard, si presume che l'azionamento elettrico sia collegato a un PC con $R_{sc} = 250$ e con una distorsione di tensione iniziale inferiore al 1%. L'impedenza interna della rete va considerata come una reattanza pura.

In una rete di alimentazione pubblica a bassa tensione, i limiti e i requisiti della norma IEC 1000-3-2 sono applicabili ad apparecchiature con corrente nominale ≤ 16 A. L'utilizzo della successiva normativa IEC 1000-3-4 è consigliabile per apparecchiature con corrente nominale > 16 A.

Se l'azionamento elettrico è utilizzato in un impianto industriale, sarà opportuno utilizzare un approccio economicamente ragionevole, che consideri l'installazione nel complesso. Tale approccio si basa sulla potenza stabilita che l'alimentazione è in grado di produrre in ogni momento. Viene stabilito un metodo di calcolo complessivo delle armoniche dell'impianto, che prevede i limiti della

distorsione di tensione o delle emissioni totali di correnti armoniche. I limiti di compatibilità stabiliti nella norma IEC1000-2-4 possono essere utilizzati come limiti della distorsione di tensione.

**5.2
IEC1000-2-2,
Compatibilità
elettromagnetica
(EMC)**

Parte 2: Ambiente - Sezione 2: Livelli di compatibilità per disturbi condotti alle basse frequenze e segnalazione nei sistemi di alimentazione di potenza pubblici a bassa tensione
La norma stabilisce i limiti di compatibilità per disturbi condotti a bassa frequenza e la segnalazione in sistemi di **alimentazione di potenza pubblica a bassa tensione**. I fenomeni di disturbo comprendono le armoniche, le interarmoniche, le fluttuazioni di tensione, le cadute e le brevi interruzioni di tensione, gli squilibri di tensione, ecc. Si può affermare che la norma stabilisca i criteri di progettazione ad uso del produttore di apparecchiature, corrispondenti ai requisiti minimi di immunità per l'apparecchiatura. La norma IEC1000-2-2 è in linea con i limiti stabiliti dalla norma EN50160, per la qualità di tensione che l'ente erogatore deve assicurare in corrispondenza dei terminali di alimentazione dell'utente.

**5.3
IEC1000-2-4,
Compatibilità
elettromagnetica
(EMC)**

Parte 2: Ambiente - Sezione 4: Livelli di compatibilità negli impianti industriali per disturbi condotti a bassa frequenza
La norma IEC1000-2-4 è simile alla IEC1000-2-2, ma stabilisce i livelli di compatibilità **per reti industriali e non pubbliche**. Copre le reti a bassa tensione e le alimentazioni a media tensione, escluse le reti per navi, velivoli, piattaforme off-shore e ferrovie.

**5.4
IEC1000-3-2,
Compatibilità
elettromagnetica
(EMC)**

Parte 3: Limiti - Sezione 2: Limiti di emissioni di correnti armoniche (apparecchiature corrente <16 A per fase
La norma tratta dei limiti alle emissioni di correnti armoniche per singole apparecchiature collegate a **reti pubbliche**. La data di implementazione della norma è il 1 Gennaio 2001, ma è in atto un'intensa attività volta alla revisione della norma prima di tale data. Le due ragioni principali per la revisione sono la necessità che la norma vada anche a coprire tensioni inferiori ai 230 V e le difficoltà e le contraddizioni connesse all'applicazione delle categorie di apparecchiature stabilite all'interno della norma.

**5.5
IEC1000-3-4,
Compatibilità
elettromagnetica
(EMC)**

La norma è stata pubblicata come Relazione tecnica di Tipo II. Sono in corso iniziative per convertirla in norma. Essa stabilisce i limiti alle emissioni di correnti armoniche per le singole apparecchiature con corrente nominale compresa tra 16 A e 75 A. E' applicabile alle reti pubbliche con tensioni nominali da 230 V monofase a 600 V trifase.

La norma stabilisce tre fasi distinte con riferimento alle procedure di collegamento delle apparecchiature. La conformità ai singoli limiti di armoniche dello Fase 1 consente il collegamento dell'apparecchiatura in qualsiasi punto del sistema di alimentazione. La Fase 2 stabilisce i limiti per le correnti armoniche e per la distorsione armonica totale, e la loro controparte alle alte frequenze, la Distorsione armonica parziale ponderata (PWhD). I limiti sono classificati e tabulati in base al rapporto di cortocircuito. La terza fase di collegamento prevede un accordo tra l'utente e l'ente erogatore dell'energia elettrica, in base alla potenza attiva stabilita per l'installazione dell'utente. Se la corrente nominale è superiore ai 75 A, si applica in ogni caso la Fase 3.

La struttura della norma è generalmente considerata positivamente, ma si potrebbe giustamente obiettare se le apparecchiature monofase e trifase debbano avere limiti differenziati allo stadio 2. E' molto probabile che la norma rimanga invariata, ma la versione con lo stato della norma attuale, conterrà limiti diversi per apparecchiature monofase e trifase.

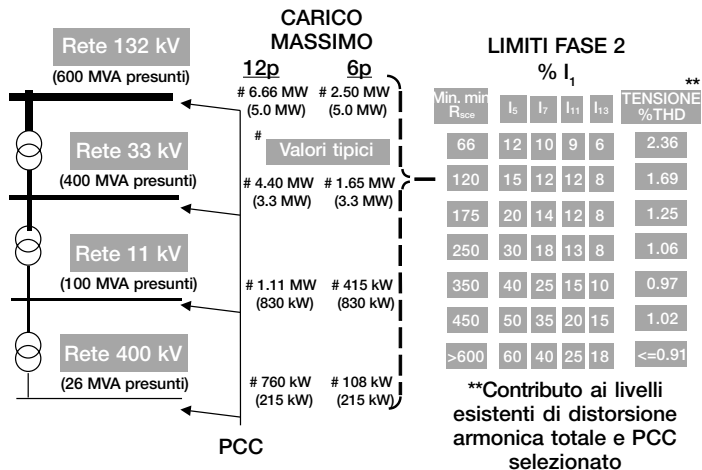


Figura 5.1 Limiti di armoniche nella proposta di norma EN61000-3-4

5.6 IEEE 519, IEEE Procedure consigliate e requisiti per il controllo delle armoniche negli azionamenti elettrici

La filosofia di sviluppo dei limiti di armoniche all'interno delle procedure consigliate, consiste nel limitare l'inserimento di armoniche da parte dei singoli utenti, in modo tale da evitare che provochino livelli inaccettabili di distorsione della tensione per le caratteristiche normali del sistema e per limitare la distorsione armonica totale a livello della tensione di alimentazione fornita dall'ente erogatore. La norma è riconosciuta inoltre come Norma Nazionale Americana ed è ampiamente utilizzata negli USA, specialmente a livello di amministrazioni locali.

La norma non stabilisce limiti per le singole apparecchiature, ma per i singoli utenti. Gli utenti sono categorizzati in base al rapporto della corrente di cortocircuito disponibile (I_{sc}) in corrispondenza della loro massima richiesta di corrente di carico in corrispondenza del punto di accoppiamento comune. La richiesta totale di corrente di carico è costituita dalla somma non lineare dei carichi lineari. Nell'ambito dell'impianto industriale, il valore PCC è chiaramente definito come il punto tra il carico non lineare e gli altri carichi.

Le singole correnti armoniche e la distorsione armonica totale consentite sono tabulate dal rapporto della corrente di cortocircuito disponibile in corrispondenza della domanda totale di corrente di carico (I_{sc}/I_L) nel punto di accoppiamento comune. I limiti sono espressi in percentuale di I_L per tutte le armoniche di ordine pari e dispari, da 2 all'infinito. La distorsione armonica totale viene definita distorsione della domanda totale e dovrebbe essere calcolata fino all'infinito. Molti autori limitano il calcolo di entrambi i singoli componenti e della distorsione al fabbisogno complessivo (Total Demand Distorsion, TDD) a 50.

La tabella 10.3 della norma viene talvolta male interpretata come se stabilisse i limiti alle emissioni di armoniche di un singolo apparato utilizzando la R_{sc} dell'apparecchiatura anziché la I_{sc}/I_L dell'intera installazione. I limiti della tabella non vanno utilizzati in questo modo, poiché andrebbero sempre utilizzati il rapporto tra la corrente di cortocircuito e la richiesta totale di corrente di carico dell'installazione .

Capitolo 6 - Valutazione delle armoniche

La "Guide for Applying Harmonic Limits on Power Systems" P519A/D6 del Gennaio 1999 introduce alcune regole di massima per la valutazione dei limiti delle armoniche in un impianto industriale. La procedura è evidenziata nel diagramma di flusso nella Figura 6.1.

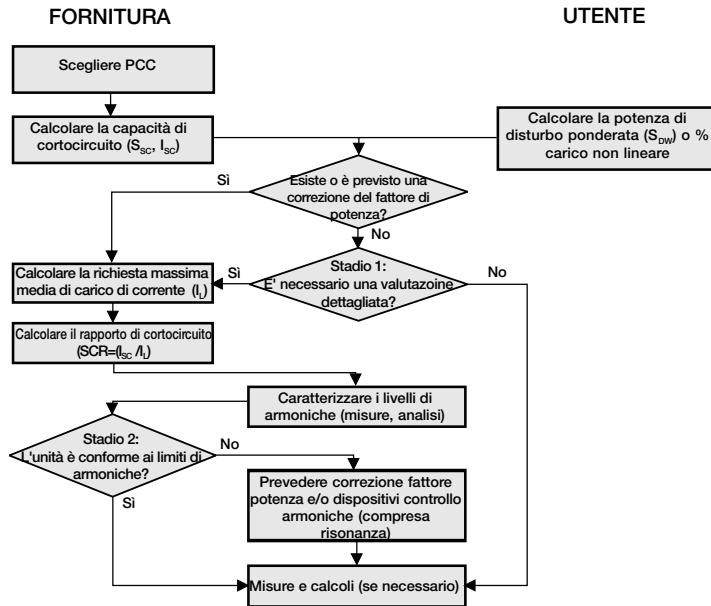


Figura 6.1 Valutazione della distorsione armonica

Capitolo 7 - Come ridurre le armoniche attraverso modifiche strutturali del sistema di azionamento in c.a.

La riduzione delle armoniche può essere conseguita sia mediante modifiche strutturali del sistema di azionamento sia utilizzando filtri esterni. Le modifiche strutturali possono consistere in un rinforzo dell'alimentazione, utilizzando azionamenti a 12 o più impulsi, nell'utilizzo di un raddrizzatore controllato o nel miglioramento del sistema di filtri interni all'azionamento.

7.1 Fattori presenti nell'azionamento in c.a. con effetto sulle armoniche

La Figura 7.1 mostra i fattori presenti nel sistema di azionamento in c.a. che hanno un certo impatto sulle armoniche. Le armoniche di corrente dipendono dalla configurazione dell'azionamento e le armoniche di tensione equivalgono alle armoniche di corrente moltiplicate per le impedenze di alimentazione.

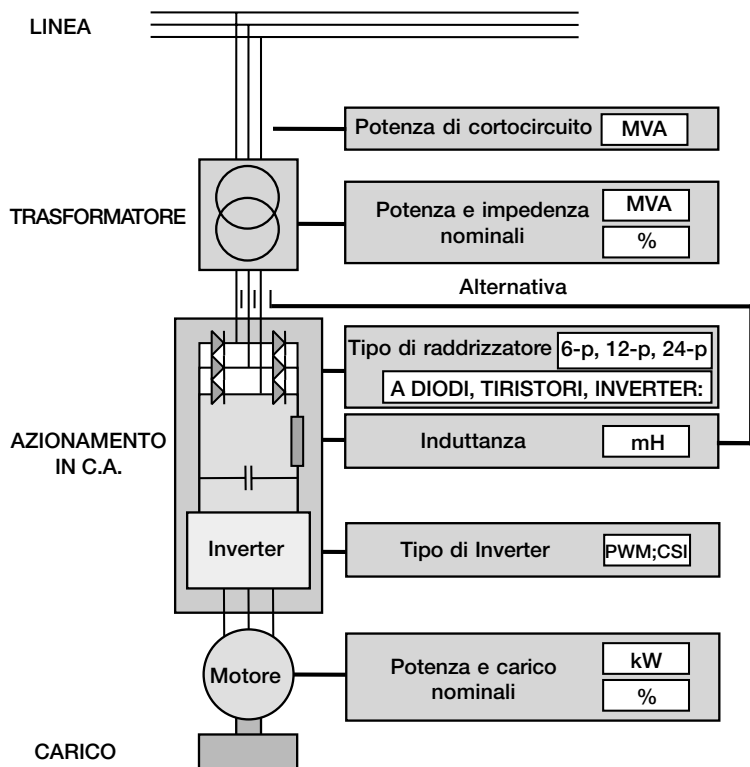


Figura 7.1 Elementi del sistema di azionamento con un impatto sulle armoniche

7.2 Tabella: Elenco dei vari fattori e dei relativi effetti

Causa	Effetto
Più grande è il motore...	maggiori sono le armoniche di corrente
Più elevato è il carico del motore...	maggiori sono le armoniche di corrente
Maggiore è l'induttanza in c.a. o in c.c....	minori sono le armoniche di corrente
Maggiore è il numero di impulsi nel raddrizzatore...	minori sono le armoniche di corrente
Più lungo è il cavo di alimentazione...	maggiori sono le armoniche di tensione
Più grande è il trasformatore...	minori sono le armoniche di tensione
Più bassa è l'impedenza del trasformatore...	minori sono le armoniche di tensione
Più alta è la capacità di alimentazione di cortocircuito...	minori sono le armoniche di tensione

7.3 Utilizzo di un raddrizzatore a diodi a 6 impulsi

Nella Figura 7.2 sono illustrati i collegamenti per diverse soluzioni di raddrizzatore. Il circuito di raddrizzatore più comune negli azionamenti in c.a. trifase è un ponte a diodi a 6 impulsi. Comprende sei raddrizzatori o diodi privi di controllo e un induttore, che, uniti a un condensatore in c.c., formano un filtro passa-basso per il livellamento della corrente in c.c. L'induttore può essere sul lato in c.c. o in c.a., oppure completamente esterno. Il raddrizzatore a 6 impulsi è semplice ed economico, ma genera un livello elevato di armoniche di basso ordine (5^a, 7^a e 11^a) specialmente in presenza di una bassa induttanza di livellamento.

La Figura 7.2. mostra la forma d'onda della corrente. Se la maggior parte del carico consiste in convertitori con raddrizzatore a 6 impulsi, il trasformatore di alimentazione deve essere sovradimensionato e può essere difficile assicurare la conformità ai requisiti delle normative. Spesso è necessario vedere a filtri per le armoniche.

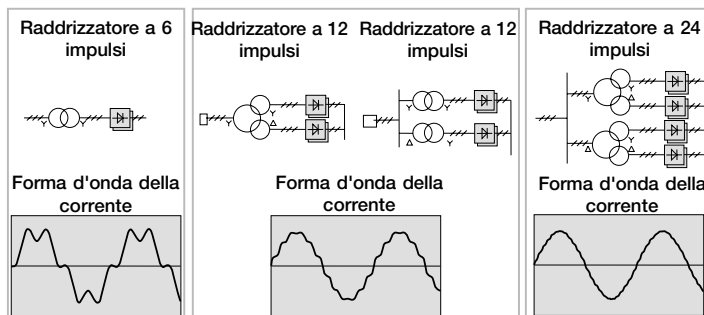


Figura 7.2 Armoniche nella corrente di linea con diverse configurazioni di raddrizzatore

7.4 Utilizzo di un raddrizzatore a diodi a 24 impulsi e a 12 impulsi

Il raddrizzatore a 12 impulsi viene costituito collegando i due raddrizzatori a 6 impulsi in parallelo per alimentare un bus comune in c.c. L'ingresso in corrispondenza dei raddrizzatori è fornito da un trasformatore a tre avvolgimenti o da due trasformatori a due avvolgimenti. In entrambi i casi i secondari del trasformatore sono sfasati di 30°. Il vantaggio di questa configurazione è che in corrispondenza del lato alimentazione alcune armoniche si trovano nella fase opposta, e pertanto vengono annullate. In teoria la componente armonica alla frequenza più bassa identificata in corrispondenza del primario del trasformatore è la 11^a.

Gli svantaggi principali sono la necessità di trasformatori speciali e un costo più elevato a fronte del raddrizzatore a 6 impulsi.

Nella Figura 7.3 viene inoltre illustrato il principio del raddrizzatore a 24 impulsi. Comprende due raddrizzatori a 12 impulsi in parallelo con due trasformatori a tre avvolgimenti, con gli avvolgimenti del primario sfasati di 30°. Il vantaggio è che praticamente tutte le armoniche di bassa frequenza vengono eliminate, con lo svantaggio di un costo elevato. Nel caso di un azionamento unico di potenza elevata o di installazioni più estese con più azionamenti, un sistema a 24 impulsi può costituire la soluzione più economica per minimizzare le distorsioni armoniche.

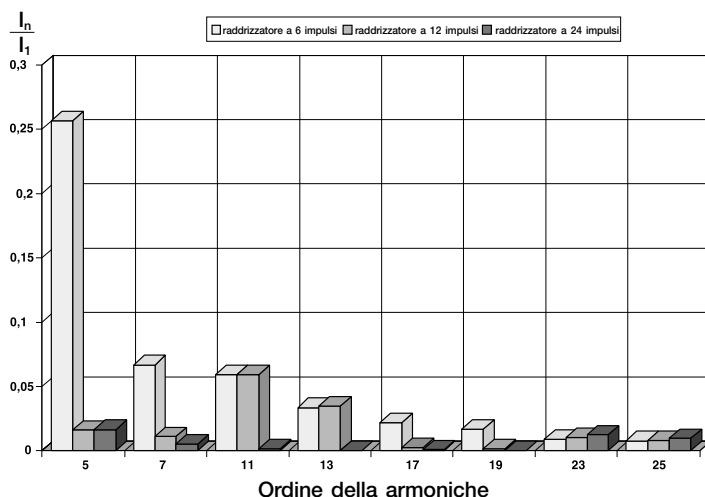


Figura 7.3 Componenti delle armoniche con diversi tipi di raddrizzatore

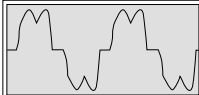
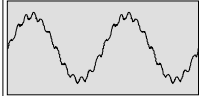
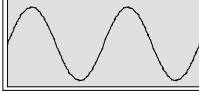
7.5 Utilizzo di un raddrizzatore a tiristori con controllo di fase

Un raddrizzatore con controllo di fase si ottiene sostituendo i diodi di un raddrizzatore a 6 impulsi con tiristori. Poiché i tiristori necessitano di un impulso di accensione per il passaggio dallo stato non conduttivo a quello conduttivo, è possibile ritardare l'angolo di fase in cui i tiristori iniziano a essere conduttivi. Ritardando l'angolo di accensione di oltre 90°, la tensione del bus in c.c. diventa negativa. Questo consente un flusso rigenerativo di potenza dal bus in c.c. di ritorno all'alimentazione di potenza.

Le configurazioni standard del bus in c.c. e dell'inverter non consentono un cambio di polarità della tensione in c.c., ed è più frequente collegare un altro ponte a tiristori antiparallelo rispetto al primo per consentire l'inversione della polarità di corrente. In questa configurazione il primo ponte è conduttivo in modo raddrizzamento e l'altro in modo rigenerazione.

Le forme d'onda della corrente dei raddrizzatori con controllo di fase sono simili a quelle del raddrizzatore a diodi a 6 impulsi, ma poiché attingono potenza con un fattore di sfasamento alternato, il fattore di potenza totale a carico parziale è piuttosto scarso. Il basso fattore di potenza determina un'elevata corrente apparente e le correnti armoniche assolute risultano più elevate rispetto a quelle connesse a un raddrizzatore a diodi.

Oltre a questi problemi, i convertitori con controllo di fase determinano micro-interruzioni di commutazione nella forma d'onda della tensione erogata. La posizione angolare delle micro-interruzioni varia in base all'angolo di accensione.

Tipo di alimentazione	Corrente TDH (%)	Tensione TDH (%) RSC=20	Tensione TDH (%) RSC=100	Forma d'onda della corrente
Raddrizzatore a 6 impulsi	30	10	2	
Raddrizzatore a 12 impulsi	10	6	1.2	
Unità di alimentazione IGBT	4	8	1.8	

La distorsione è in % sui valori RMS

Figura 7.4 Distorsione di varie tipologie di unità di alimentazione. I valori possono variare nei singoli casi.

7.6 Utilizzo di ponti IGBT

L'introduzione di un ponte raddrizzatore, composto di componenti auto-commutati, apporta vari vantaggi e possibilità a fronte di quelli a commutazione di fase. Come un raddrizzatore a commutazione di fase, questo dispositivo consente sia il raddrizzamento che la rigenerazione, ma consente di controllare il livello di tensione in c.c. e il fattore di sfasamento di potenza separatamente, indipendentemente dalla direzione del flusso di potenza.

I vantaggi principali sono:

- Funzione di sicurezza in caso di interruzioni dell'alimentazione di rete.
- Dinamica elevata del controllo dell'azionamento anche nel range di indebolimento di campo.

- Possibilità di generare potenza reattiva e di compensare le correnti armoniche dei carichi paralleli.
- Corrente di alimentazione quasi sinusoidale con basso contenuto di armoniche. La Figura 7.5 illustra i risultati misurati per un azionamento. Confrontandoli con quelli della Figura 7.3 si nota una chiara differenza. L'IGBT ha un bassissimo contenuto di armoniche alle frequenze più basse, ma un po' più elevato a frequenze più alte.
- Capacità di incremento di tensione. In caso di bassa tensione di alimentazione, la tensione in c.c. può essere incrementata per mantenere la tensione del motore più alta rispetto alla tensione di alimentazione.

Lo svantaggio principale consiste nel costo elevato connesso al ponte IGBT e alla necessità di altri filtri.

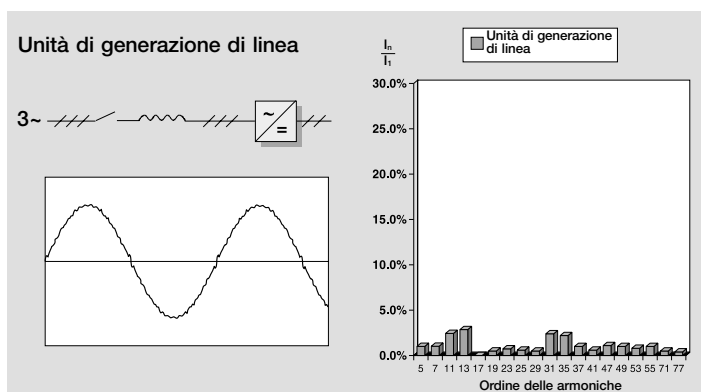


Figura 7.5 Armoniche nell'unità di generazione di linea IGBT della corrente di linea

7.7 Utilizzo di un'induttore maggiore in c.a. o in c.c.

Le armoniche di un azionamento in c.a. della sorgente di tensione possono essere notevolmente ridotte collegando un'induttanza di dimensioni sufficienti in corrispondenza dell'ingresso in c.a. o del bus in c.c. Si è riscontrata una tendenza a ridurre le dimensioni del convertitore, mentre l'induttanza è stata rimpicciolita e, in alcuni casi, eliminata. L'effetto di tali iniziative si può notare nelle forme della curva della Figura 7.4.

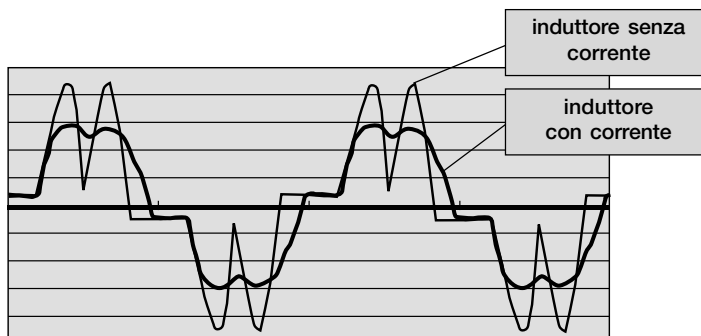


Figure 7.6 L'effetto dell'induttanza sulla corrente di linea

La tabella nella Figura 7.5 mostra l'effetto delle dimensioni dell'induttanza in c.c. sulle armoniche. Per i primi cinque componenti di armoniche, la distorsione armonica totale teorica minima è pari al 29%. Tale valore si raggiunge praticamente quando l'induttanza è pari a 100 mH diviso per i kW motore o 1 mH per un motore da 100 kW (415 V, 50 Hz). Non è opportuno selezionare induttanze maggiori, ma circa 25 mH divise per i kW motore da una distorsione armonica totale approssimativa del 45%. Questo equivale a 0,25 mH per un motore da 100 kW.

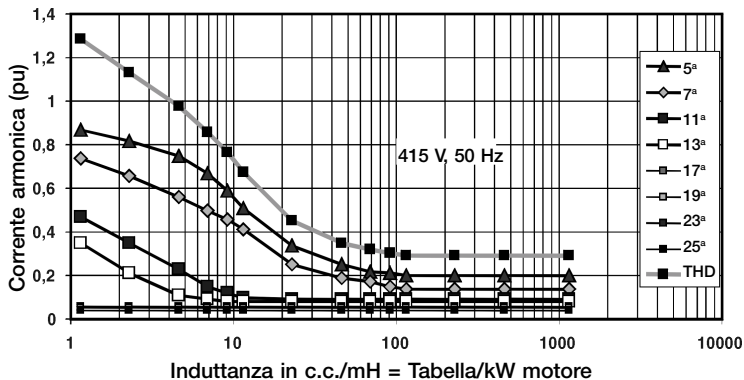


Figura 7.7 La corrente armonica in funzione dell'induttanza in c.c.

La distorsione di tensione con alcune distorsioni di corrente dipende dal Rapporto di Cortocircuito R_{sc} dell'alimentazione. Più elevato è il rapporto, più basso è la distorsione di tensione, come si può rilevare dalla Figura 7.8.

Carico 60 A, potenza trasformatore 50-315 kVA, livello errore di linea 150 MVA

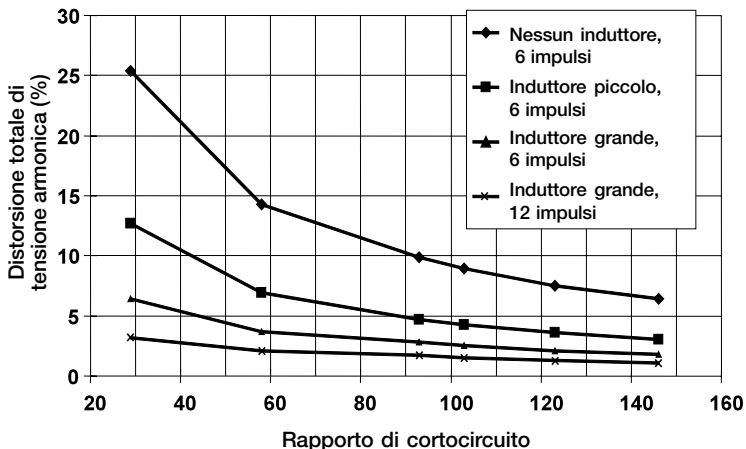


Figura 7.8 Distorsione totale di tensione armonica per tipo di azionamento in c.a. e dimensioni del trasformatore

La Figura 7.9 illustra un semplice nomogramma per il calcolo delle tensioni armoniche. Nel grafico sotto riportato, selezionare da prima i chilowatt motore, poi i kVA del trasformatore, quindi muoversi orizzontalmente verso la linea diagonale, e a questo punto salire e fermarsi sulla curva corrispondente all'applicazione. Girare a sinistra verso l'asse delle ordinate e leggere la distorsione totale di tensione armonica.

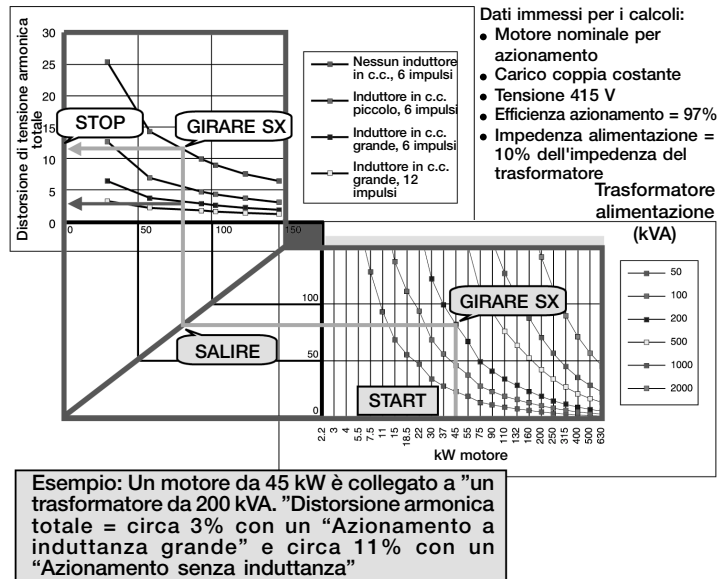


Figura 7.9 Nomogramma della distorsione armonica totale

La Figura 7.10. illustra i risultati di prove di laboratorio eseguite su azionamenti di diversi produttori. L'azionamento A con un'induttanza in c.c. di grandi dimensioni, presenta la distorsione di corrente armonica più bassa, gli azionamenti senza induttanza installati producono la massima distorsione.

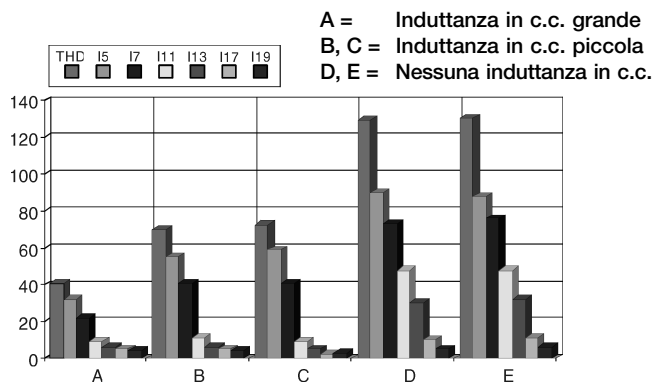


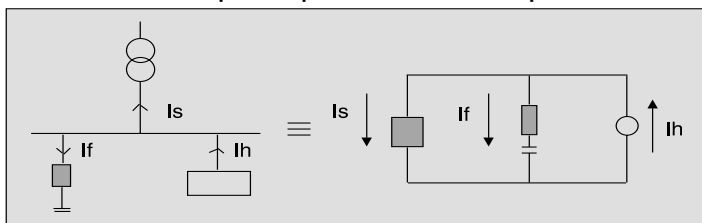
Figura 7.10. Correnti armoniche con diverse induttanze in c.c.

Capitolo 8 - Altri metodi di riduzione delle armoniche

L'uso di filtri è un metodo per ridurre le armoniche negli impianti industriali quando la distorsione armonica è aumentata gradualmente, oppure come soluzione globale in un nuovo impianto. Vi sono due metodi principali: filtri attivi e passivi.

8.1 Filtro passivo tarato a braccio singolo

La Figura 8.1. illustra il principio di base dei filtri passivi tarati a braccio singolo. I filtri passivi tarati a braccio singolo devono essere applicati al singolo componente di armonica più ridotto in corrispondenza del quale si verifichi una significativa generazione di armoniche all'interno del sistema. Per sistemi che alimentano principalmente un carico industriale, con ogni probabilità si tratterà della quinta armonica. Al di sopra della frequenza tarata, le armoniche vengono assorbite, mentre al di sotto di tale frequenza possono essere amplificate.



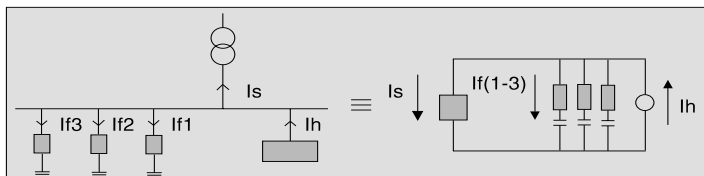
- Starato - Frequenza di taratura unica
- Armoniche assorbite sopra la frequenza di taratura
- Possibilità di amplificazione delle armoniche sotto la frequenza di taratura
- Limitazione della riduzione delle armoniche attraverso KVAR e rete

Figura 8.1 Filtro passivo tarato a braccio singolo

Questa tipologia di filtri comprende una serie di induttori con un banco di condensatori, e la posizione ideale del filtro passivo è in prossimità dei carichi che generano le armoniche. Questa soluzione normalmente non viene utilizzata per nuove installazioni.

8.2 Filtro passivo tarato a bracci multipli

Il principio di questo filtro è illustrato nella Figura 8.2. Il filtro presenta diversi bracci tarati su uno o più componenti di armoniche, che dovrebbero corrispondere alle frequenze armoniche significative più basse del sistema. Il filtro multiplo è caratterizzato da un migliore assorbimento delle armoniche rispetto a quello a braccio singolo.



- Capacitiva al di sotto della frequenza di sintonizzazione/induttiva al di sopra
- Migliore assorbimento delle armoniche
- I criteri di progettazione devono considerare le armoniche amplificate attraverso il filtro
- Limitazione attraverso KVAR e rete

Figura 8.2 Filtro tarato passivo a bracci multipli

I filtri passivi a bracci multipli vengono spesso utilizzati per installazioni di azionamenti in c.c. di grandi dimensioni, dove un trasformatore dedicato alimenta l'intera installazione.

8.3 Filtro esterno attivo

I filtri tarati di tipo passivo introducono nuove risonanze che possono determinare ulteriori problemi di armoniche. Le più recenti tecnologie di potenza di tipo elettronico realizzano prodotti in grado di controllare la distorsione armonica in modo attivo. Tali filtri di tipo attivo, illustrati nella Figura 8.3, assicurano una compensazione per i componenti di armoniche presenti sul sistema di erogazione dell'energia basati sulla generazione attuale di armoniche in un qualsiasi momento.

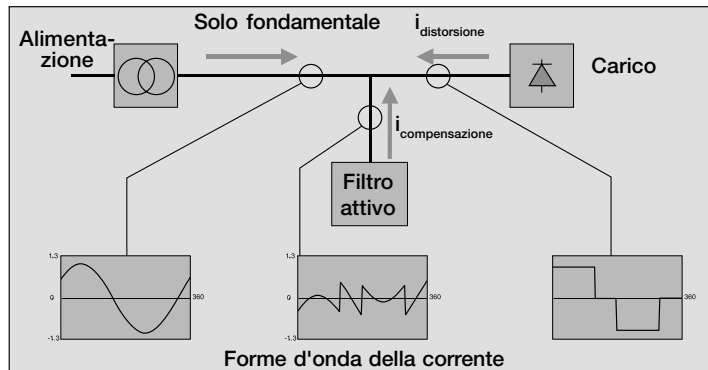


Figura 8.3 Diagramma di principio di un filtro attivo esterno

Il filtro attivo compensa le armoniche generate dai carichi non lineari, generando gli stessi componenti di armoniche nella fase opposta, come illustra la Figura 8.4. I filtri attivi esterni sono i più adatti in caso di piccoli azionamenti multipli. Sono relativamente costosi a fronte di altri metodi.

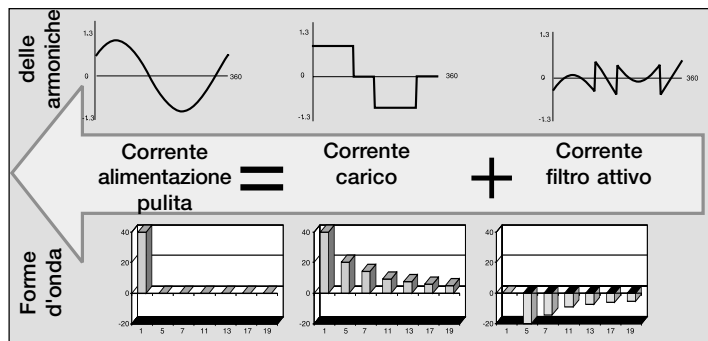


Figura 8.4 Forme d'onda e armoniche di un filtro attivo esterno

Capitolo 9 - Attenuazione delle armoniche: Riepilogo

Esistono svariate possibilità di 'attenuazione delle armoniche, sia all'interno del sistema di azionamento che al suo esterno. Tutte presentano vantaggi e svantaggi, con diverse implicazioni di costo. La soluzione migliore dipende dal carico totale, dall'alimentazione e dalla distorsione massima.

Le seguenti tabelle forniscono una comparazione tra diverse soluzioni interne a fronte di un sistema di base privo di induttore. Il contenuto di armoniche considera un carico al 100%. I costi si riferiscono ad azionamenti di piccole dimensioni. Per i sistemi dotati di più azionamenti, la soluzione a 12 impulsi risulta molto più economica.

9.1 Raddrizzatore a 6 impulsi senza induttore

Costo di produzione 100%

Componenti tipici delle correnti armoniche.

Fondamentale	5 ^a	7 ^a	11 ^a	13 ^a	17 ^a	19 ^a
100%	63%	54%	10%	6,1%	6,7%	4,8%

9.2 Raddrizzatore a 6 impulsi con induttore

Costo di produzione 120%. Aggiunta d'induttanza in c.c. o in c.a.

Componenti tipici delle correnti armoniche.

Fondamentale	5 ^a	7 ^a	11 ^a	13 ^a	17 ^a	19 ^a
100%	30%	12%	8,9%	5,6%	4,4%	4,1%

9.3 Raddrizzatore a 12 impulsi con trasforma- tore polycon

Costo di produzione 200%

Componenti tipici delle correnti armoniche.

Fondamentale	5 ^a	7 ^a	11 ^a	13 ^a	17 ^a	19 ^a
100%	11%	5,8%	6,2%	4,7%	1,7%	1,4%

9.4 Trasformatore a 12 impulsi con avvolgi- mento doppio

Costo di produzione 210%

Componenti tipici delle correnti armoniche.

Fondamentale	5 ^a	7 ^a	11 ^a	13 ^a	17 ^a	19 ^a
100%	3,6%	2,6%	7,5%	5,2%	1,2%	1,3%

9.5
Raddrizzatore
a 24 impulsi

Costo di produzione 250%
Componenti tipici delle correnti armoniche.

Fondamentale	5 ^a	7 ^a	11 ^a	13 ^a	17 ^a	19 ^a
100%	4,0%	2,7%	1,0%	0,7%	1,4%	1,4%

9.6
Raddrizzatore
attivo IGBT

Costo di produzione 250%. Non significativo se è in ogni caso necessaria la frenatura elettrica.
Componenti tipici delle correnti armoniche.

Fondamentale	5 ^a	7 ^a	11 ^a	13 ^a	17 ^a	19 ^a
100%	2,6%	3,4%	3,0%	0,1%	2,1%	2,2%

Capitolo 10 - Definizioni

S: Potenza apparente

P: Potenza attiva

Q: Potenza reattiva

Rsc: Short circuit ratio (Rapporto di cortocircuito) è definito come la potenza di cortocircuito dell'alimentazione in corrispondenza del Punto di accoppiamento comune alla potenza nominale apparente dell'impianto considerato.
 $Rsc = Ss / Sn$.

ω_1 : Frequenza angolare della componente fondamentale
 $\omega_1 = 2\pi \cdot f_1$, dove f_1 è la frequenza fondamentale (p. es. 50Hz o 60Hz).

n: N intero = 2, 3, ... ∞ . Frequenze armoniche definite come $\omega_n = n \cdot \omega_1$.

I_n : Valore RMS della ennesima componente armonica della corrente di linea.

Z_n : Impedenza alla frequenza $n \cdot \omega_1$.

% U_n : Componente di tensione armonica in percentuale sulla tensione fondamentale (linea).

THD: Total Harmonic Distortion (Distorsione armonica totale) è la corrente in ingresso definita come:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1}$$

dove I_1 è il valore rms della corrente di frequenza fondamentale. La tensione d'ingresso THD può essere calcolata in modo simile. Segue un esempio per i componenti della 25^a armonica più bassa con valori teorici:

$$THD = \frac{\sqrt{20^2 + 14,3^2 + 9,1^2 + 7,7^2 + 5,9^2 + 5,3^2 + 4,4^2 + 4^2}}{100}$$
$$THD = 29 \%$$

PWHD: Partial weighted harmonic distortion (Distorsione armonica parziale ponderata), definita come:

$$PWHD = \sqrt{\sum_{n=14}^{40} h \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2}$$

PCC: Point of Common Coupling (Punto di accoppiamento comune) è definito nel presente testo come un punto dell'alimentazione fornita che può essere comune all'apparecchiatura in questione e ad altre apparecchiature. Vi sono varie definizioni di PCC all'interno delle norme, e ancora più numerose sono le interpretazioni di tali definizioni nell'ambito della documentazione tecnica. La definizione utilizzata è considerata la più valida in termini tecnici.

PF: Power Factor (Fattore di potenza) si definisce come $PF = P/S$ (potenza/tensione - ampere) = $I_1 / I_s * DPF$ (Con corrente sinusoidale PF uguale a DPF).

DPF: Displacement Power Factor (Fattore di potenza di sfasamento) è definito come $\cos\phi_1$, dove ϕ_1 è l'angolo di fase tra la corrente a frequenza fondamentale assorbita dall'apparecchiatura e il componente di frequenza fondamentale della tensione di alimentazione.

Capitolo 11 - Indice analitico

A

ABB 6
alimentazione pubblica 12
American National Standard
14
Anti-parallelo 20
armonica teorica 10
Attenuazione 5, 26
Avviamento motore 8
azionamenti a velocità variabile
8
azionamento 12

B

Bus comune in c.c. 19

C

Calcolo 5, 9, 10, 11, 12, 15, 16,
23
Calcolo della distorsione 5, 6
Carico del convertitore 6
Carico non-lineare 6, 8, 15, 16
cavo di alimentazione 9, 18
Coefficiente di correzione 10
Compatibilità elettromagnetica
(EMC) 22
Componenti delle armoniche
7, 19, 22, 24, 25, 28
Computer 8
Condensatore in c.c. 18
Convertitore 6, 9, 10, 12, 18, 20,
21
Corrente in c.c. 18
corrente rettangolare 7
Correnti armoniche 6, 7, 9, 10,
11, 12, 13, 15, 20, 21, 22, 23, 26,
27
Correnti di linea 6, 18, 21
Costo di produzione 26, 27

D

Display elettronico 8
Dispositivo elettronico 8
Distorsione armonica 6, 8, 9,
10, 11, 12, 14, 15, 16, 19, 23, 25,
28
Distorsione armonica parziale
12

Distorsione armonica totale
10, 12, 14, 15, 22, 23, 28
distorsione della domanda
totale 15
distorsione totale di corrente
11
distorsione totale di tensione
11
distribuzione di potenza 6
E
Effetto 5, 6, 8, 17, 18, 21, 22
Effetto di commutazione 10
ente erogatore 14

F

fattore di potenza 16, 20, 29
Fattore di potenza di
sfasamento 20, 29
Fenomeni delle armoniche 6, 7
Filtri 17, 18, 21, 24
Filtri esterni 17
Filtro attivo 5, 24, 25
Filtro passa-basso 18
Filtro passivo 24, 25
Filtro passivo a bracci multipli
5, 24, 25
filtro passivo tarato a braccio
singolo 24
Frequenza 9, 12, 13, 14, 19, 24,
28, 29
Frequenza fondamentale 7, 28,
29

G

gruppi di continuità 8

I

Illuminazione elettronica 8
impedenza di corto circuito 9
impedenza di sorgente 4, 9
incremento di tensione 21
Indicatore di misura 8
Induttanza 17, 18, 22, 23
Induttanza in c.a. 21
Induttore 5, 18, 21, 22, 23, 24,
26
Installazione 9, 12, 14, 15, 19,
24, 25

- Installazione dell'utente 14
- Installazione industriale 12
- Interruttore 8
- Interruzione di commutazione 20

- L**
- Limite delle armoniche 12, 13, 14, 15, 16
- Limite di compatibilità 12, 13

- M**
- Marcatura CE 12
- modifica strutturale 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23
- modo raddrizzamento 20
- modo rigenerazione 20

- N**
- Nomogramma della distorsione 23
- norma 12, 13, 14, 15, 18, 20, 29
- Norma prodotto EMC 12

- P**
- Ponte IGBT 20, 21
- porta di potenza 12
- Potenza apparente 28
- Potenza attiva 14, 28
- potenza di corto circuito 9, 14, 16, 17, 28
- potenza reattiva 21, 28
- Prove di laboratorio 23
- punto di accoppiamento comune 15, 29
- PWHD 14, 28

- Q**
- Quinta armonica 7

- R**
- raddrizzatore 5, 6, 7, 10, 17, 18, 19, 20, 26, 27
- Raddrizzatore a 12 impulsi 10, 18, 19, 20
- Raddrizzatore a 24 impulsi 18, 19
- Raddrizzatore a 6 impulsi 7, 10, 18, 19, 20
- Raddrizzatore a commutazione di fase 20
- Raddrizzatore trifase a 6 impulsi 7
- rapporto di corto circuito 22, 28
- Riduzione delle armoniche 17, 24, 25

- S**
- sistemi di saldatura 8
- sorgente 6, 8, 9, 21
- Spazio Economico Europeo 12
- Surriscaldamento 8

- T**
- TDD 15
- tensione 6, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23
- Tensione armonica 10, 23, 28
- tensione di alimentazione 6, 21, 29
- tiristore 17, 19, 20
- trasformatore a due avvolgimenti 19
- trasformatore a tre avvolgimenti 19
- trasformatore di alimentazione 9, 18
- Trasformatore di rete 6

- V**
- Valutazione delle armoniche 16



ABB Industria S.p.A.

Viale Edison 50

20099 Sesto S. Giovanni (Mi)

Tel: 02 - 26 23 27 32

Fax: 02 - 26 23 29 79

Internet: abb.industria@it.abb.com



Copyright © ABB Automation Group Ltd, 2000 3BFE 64336771 R0104 Specifiche soggette a modifiche senza preavviso.
IT 7.7.2000