

INTRODUZIONE

Data una grandezza sinusoidale (fondamentale) si definisce armonica una grandezza sinusoidale di frequenza multipla.

L'ordine dell'armonica è il rapporto tra la sua frequenza e quella della fondamentale: ad esempio, se la fondamentale è a 50Hz l'armonica del terzo ordine, o terza armonica, ha una frequenza di 150Hz¹.

La somma della fondamentale e delle armoniche dà luogo ad una funzione risultante periodica, ma non sinusoidale (forma d'onda distorta). Una forma d'onda distorta equivale pertanto alla presenza di armoniche e viceversa. Generalizzando, una qualunque funzione periodica si può scomporre in una serie di funzioni sinusoidali (serie di Fourier). I generatori elettrici forniscono una tensione sinusoidale a 50Hz, ma non sempre la corrente che fluisce nel carico è sinusoidale.

La corrente non è sinusoidale quando il carico presenta una impedenza variabile durante il periodo T (pari a 20ms a 50Hz); in altri termini, quando la caratteristica tensione/corrente del carico non è lineare. In questi casi si dice, in breve, che il carico non è lineare.

La corrente di magnetizzazione di un trasformatore, ad esempio, è deformata da una armonica di terzo grado, perché tensione e corrente sono legate tramite la caratteristica di magnetizzazione del ferro, notoriamente non lineare.

Altri esempi tipici di carichi non lineari sono i raddrizzatori (carica batterie, saldatrici, celle elettrolitiche, ecc.), gli inverter, gli avviatori elettronici, gli azionamenti di motori a frequenza variabile, gli alimentatori elettronici a commutazione (switching), le lampade a scarica (tubi fluorescenti, lampade al sodio, a vapori di mercurio, ecc.). Una corrente non sinusoidale provoca nel circuito cadute di tensione distorte, così che anche la tensione in un punto del circuito diventa distorta. La tensione lungo la linea è data dalla tensione fornita dal trasformatore, meno la caduta di tensione distorta. La distorsione della tensione cresce quindi con la caduta di tensione, cioè con la distanza dal trasformatore e con l'impedenza della linea.

In sintesi, la distorsione in un punto della rete elettrica è tanto minore quanto maggiore è la corrente (potenza) di cortocircuito in quel punto. La rete elettrica può essere quella dell'ente distributore, disturbata da utenti che producono armoniche, oppure quella interna dell'utente stesso.

Una tensione distorta provoca armoniche anche sui carichi lineari. La presenza di armoniche influisce su tutti i fenomeni legati all'aumento di frequenza. Ad esempio, la reattanza capacitiva diminuisce e dunque aumenta la corrente nei condensatori, i quali possono danneggiarsi o addirittura entrare in risonanza; aumentano le perdite nel ferro per isteresi e per correnti parassite; aumentano le perdite nei cavi, ecc.

Facile immaginare che le armoniche possano provocare il cattivo funzionamento delle apparecchiature elettroniche.

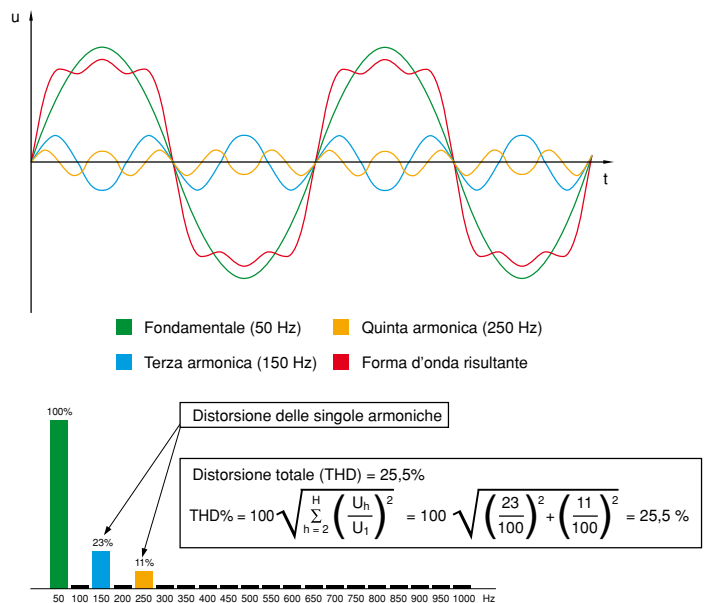


Figura 1: misura della distorsione armonica eseguita con un analizzatore di rete

Nota 1: se il rapporto tra la frequenza della componente e quella della fondamentale non è intero (multiplo) ma decimale, si parla di interarmonica.

RIFASAMENTO DEI TRASFORMATORI - MT / BT

Il problema delle armoniche rientra in quello più ampio della compatibilità elettromagnetica.

La cosiddetta buona educazione è un insieme di regole che hanno lo scopo di rendere compatibili tra di loro più persone che vivono nello stesso ambito, facendo in modo che l'una non disturbi le altre oltre certi limiti e viceversa; nel contempo ognuna delle persone deve possedere un minimo di tolleranza verso le altre. La compatibilità elettromagnetica è l'equivalente della buona educazione nel settore elettrico: le regole per la compatibilità elettromagnetica stabiliscono i limiti di emissione dei disturbi e il livello di immunità ai disturbi stessi, in modo che più apparecchi elettrici disposti nello stesso spazio e/o alimentati dalla stessa rete possono funzionare correttamente. I disturbi possono essere irradiati per mezzo del campo elettromagnetico, oppure essere trasmessi (condotti) tramite la rete. Le armoniche sono un tipico esempio di disturbo condotto.

Le norme stabiliscono, per gli apparecchi che producono armoniche, un limite al contenuto di armoniche e, per gli apparecchi sensibili alle armoniche, il livello di immunità alle armoniche stesse.

Per valutare l'effetto di tutte le armoniche è stato introdotto il fattore di distorsione totale THD (Total Harmonic Distorsion):

$$\text{THD}\% = 100 \times \sqrt{\sum_{n=2}^N \left(\frac{A_n}{A_1}\right)^2}$$

dove:

A_n è l'ampiezza dell'armonica di ordine n

A_1 è l'ampiezza della fondamentale

N è l'ordine di armonica di grado più elevato considerato.

Nel caso di una sola armonica il fattore di distorsione si riduce al valore percentuale (in ampiezza) dell'armonica rispetto alla fondamentale.

Il fattore di distorsione spesso viene indicato con THDf per evidenziare che è calcolato rispetto al valore della fondamentale. In alcuni casi viene specificato anche il THDr, ovvero il fattore di distorsione calcolato rispetto al vero valore efficace della grandezza misurata.

CARATTERISTICHE DEI SISTEMI ELETTRICI

Gli effetti di una o più sorgenti di armoniche su un impianto elettrico di potenza dipende principalmente dalla caratteristica risposta in frequenza. I dispositivi o i carichi non lineari possono essere rappresentati come sorgenti di correnti armoniche quindi la distorsione armonica di tensione nel sistema dipende dalla caratteristica impedenza-frequenza.

La risposta in frequenza del sistema può essere influenzata da diversi fattori.

Potenza di cortocircuito del sistema

La potenza di cortocircuito del sistema è un'indicazione dell'impedenza del sistema alla frequenza fondamentale in un punto prefinito dell'impianto. Per semplici sistemi di alimentazione questa è anche una misura dell'impedenza del sistema alle frequenze armoniche se si moltiplica per l'ordine di armonica.

I sistemi con le potenze di cortocircuito più elevate sono caratterizzati da contenuti valori dell'impedenza del sistema/impianto e quindi da contenute distorsioni di tensione, a parità di sorgente di corrente armonica.

Condensatori e cavi di alimentazione

I condensatori utilizzati per migliorare il fattore di potenza degli impianti ed i cavi isolati di alimentazione sono i componenti che influenzano maggiormente la risposta in frequenza di un impianto. Il collegamento di condensatori può provocare condizioni di risonanza (serie o parallelo) che possono amplificare il livello delle armoniche.

Le capacità di linea dei cavi di distribuzione e in generale dei cavi isolati possono essere considerate in parallelo con l'induttanza del sistema quindi sono simili a dei condensatori di shunt.

Normalmente i gruppi di condensatori per rifasamento sono dominanti nei sistemi di distribuzione industriale ed il loro effetto prevale su quello causato dalle capacità dei cavi.

Caratteristica di carico

Il carico ha due importanti effetti sulla caratteristica di risposta in frequenza:

- la parte resistiva riduce l'ampiezza del livello di armonica in prossimità della frequenza di risonanza parallelo;
- motori e altri carichi dinamici, che contribuiscono alla potenza di cortocircuito del sistema, possono modificare le frequenze a cui si possono manifestare fenomeni di risonanza: questi carichi appaiono in parallelo all'induttanza di cortocircuito del sistema quando si calcolano le frequenze di risonanza.

CONDIZIONI DI RISONANZA

Le condizioni di risonanza sono da considerare i più importanti fattori che influenzano il livello di armoniche nei sistemi.

Considerando la circolazione di armoniche di corrente, la condizione di risonanza parallelo è equivalente ad una elevata impedenza mentre la risonanza serie equivale ad una bassa impedenza.

Quando queste correnti vedono una elevata impedenza dovuta a condizioni di risonanza parallelo si manifestano significative distorsioni di tensione mentre nel caso di risonanza serie amplificazioni delle correnti.

Quindi è molto importante essere in grado di valutare, in modo più o meno dettagliato, la risposta in frequenza del sistema per evitare i problemi di risonanza nei sistemi.

CIRCOLAZIONE DI CORRENTE ARMONICA

Le armoniche di corrente tendono a fluire dai carichi non lineari (sorgenti di armoniche) attraverso i percorsi a più bassa impedenza, normalmente le sorgenti di alimentazione. L'impedenza delle alimentazioni è normalmente molto più bassa di quelle dei percorsi paralleli rappresentati dai carichi. Comunque le correnti armoniche si ripartiranno in funzione del rapporto delle impedenze.

Le armoniche di ordine più elevato invece preferiranno i carichi composti o comprendenti condensatori perché alle alte frequenze presentano una bassa impedenza.

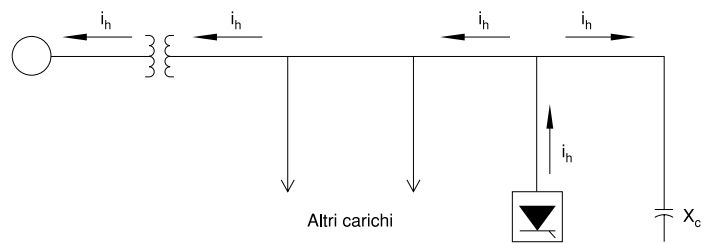


Figura 2: circolazione di corrente armonica I_h in un sistema/impianto elettrico

Risonanza parallelo

La risonanza parallelo si verifica quando la reattanza induttiva e capacitiva, viste dal punto di connessione di un carico, sono, ad una specifica frequenza, uguali.

Se la combinazione di condensatori di rifasamento e di induttanze di linea o di trasformatori risultano in risonanza parallelo in prossimità di una delle armoniche generate da un carico non lineare, si manifesterà una elevata distorsione della tensione sui condensatori; infatti, a causa del valore elevato della impedenza equivalente alla frequenza di risonanza, anche una piccola corrente armonica può causare elevate distorsioni di tensione.

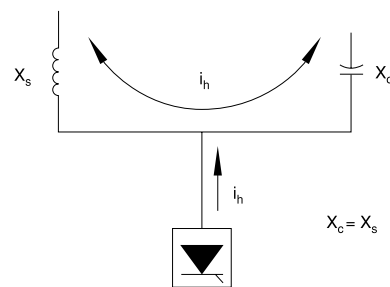


Figura 3: condizione di risonanza parallelo

Risonanza serie

La risonanza serie è il risultato di combinazioni serie di condensatori e induttanze. La risonanza serie si manifesta come un percorso a bassa impedenza per le armoniche di corrente e quindi tende ad intrappolare qualsiasi armonica di corrente che risulta accordata con esso.

Questo effetto ha come risultato la circolazione di una corrente distorta, sui condensatori che può causare un deterioramento anomalo.

Un esempio di circuito serie è rappresentato da un trasformatore con condensatori collegati al secondario: questo appare come un circuito serie quando visto dal lato primario del trasformatore.

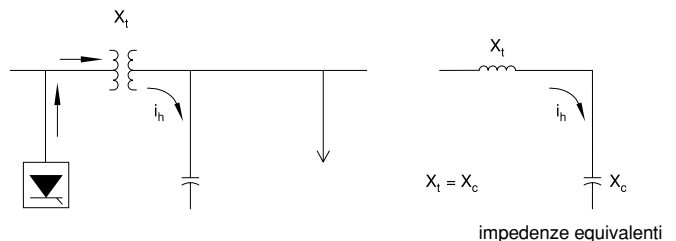


Figura 4: condizione di risonanza serie

Metodo di analisi

Per calcolare il livello armonico risultante in un impianto a causa di sorgenti armoniche è necessario conoscere le caratteristiche delle sorgenti armoniche e la risposta in frequenza del sistema.

Molte sorgenti di armoniche possono essere rappresentate come sorgenti ideali di corrente: l'ipotesi su cui si basa questa assunzione è che la tensione del sistema non è distorta.

Una volta determinata la caratteristica della sorgente di armoniche si può calcolare la risposta del sistema; importanti elementi del modello usato per eseguire questi calcoli sono:

- impedenza equivalente di cortocircuito del sistema,
- condensatori,
- caratteristiche delle linee e dei cavi del sistema,
- caratteristiche dei carichi.

L'analisi del sistema per essere eseguita attraverso calcoli relativamente semplici per alcuni impianti industriali.

Tuttavia molti sistemi richiedono, per determinare risultati significativi, programmi di simulazione che permettono di rappresentare la risposta del sistema alle diverse frequenze.

Calcolo semplificato

Semplificando gli impianti industriali con lo schema qui di seguito indicato è possibile determinare molto facilmente la frequenza di risonanza con la formula seguente:

$$hr = \sqrt{\frac{MVA_{sc}}{Mvar_{cap}}}$$

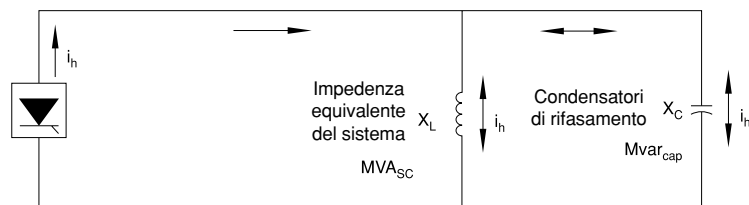


Figura 5: semplice circuito per calcoli manuali

dove:

hr è la frequenza di risonanza, intesa come multiplo della frequenza fondamentale.

MVA_{sc} è la potenza di corto circuito nel punto di studio, ovvero in punto in cui sono inseriti i condensatori di rifasamento, espressa in MVA

M var_{cap} è la potenza reattiva capacitiva installata, espressa in Mvar

Per poter completare questa verifica, in prima approssimazione, si può considerare come potenza di corto circuito la sola potenza di corto circuito del trasformatore MT/BT che alimenta il sistema/impianto in oggetto, così che:

$$P_{cc} = \frac{A}{V_{cc} \%} \times 100$$

dove:

A la potenza del trasformatore MT/BT, espressa in kVA

V_{cc} % è la tensione di cortocircuito percentuale del trasformatore MT/BT

Nei casi in cui i condensatori siano inseriti a gradini attraverso un regolatore elettronico, il calcolo deve essere ripetuto, se necessario, per tutte le combinazioni possibili dei singoli gradini perché per ciascun valore di potenza reattiva inserita in rete si troveranno altrettanti valori di frequenze a cui potranno corrispondere condizioni di risonanza parallelo.

RIFASAMENTO IN PRESENZA DI ARMONICHE

Il rifasamento dei carichi elettrici non lineari è spesso ostacolato dalle armoniche di corrente prodotte o iniettate sulla linea di alimentazione. Un esempio di sistema/impianto tipico è illustrato in figura 6: nella parte a) della figura è mostrata una rete alternata trifase, rappresentata con la propria induttanza di linea L_1 e con la forza elettromotrice a vuoto E ; essa alimenta un ponte raddrizzatore trifase che, a sua volta, è connesso con un carico in corrente continua; sono pure mostrati gli eventuali condensatori di rifasamento C_r . Gli effetti sulla linea della componente fondamentale e delle componenti armoniche della corrente assorbita dal convertitore possono essere studiati con gli schemi equivalenti disegnati nella parte b): essi sono i circuiti equivalenti lato alternata alla frequenza di 50Hz e ad una generica frequenza armonica di valore $k \cdot 50\text{Hz}$, trattando il convertitore statico come un generatore di corrente.

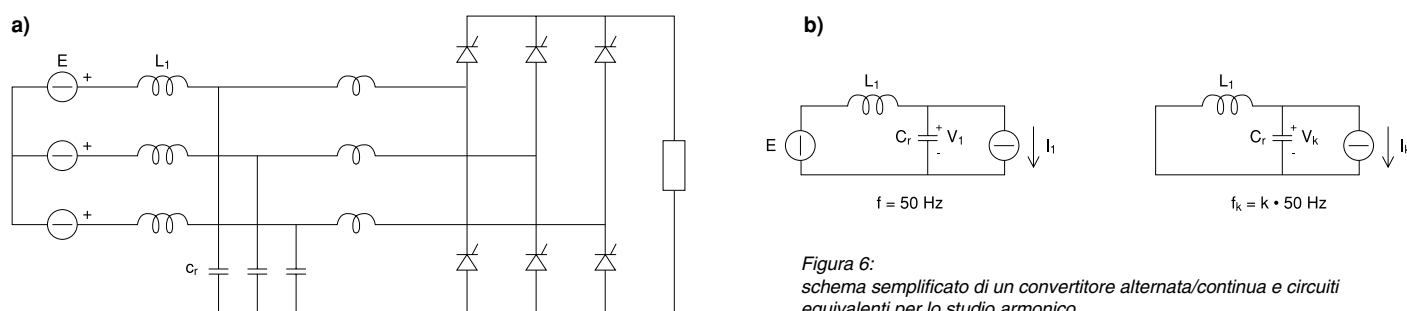


Figura 6: schema semplificato di un convertitore alternata/continua e circuiti equivalenti per lo studio armonico

Supposta nota l'ampiezza della generica corrente armonica, la relativa armonica di tensione ai morsetti di ingresso del convertitore si può valutare con la

$$V_k = Z_k \times I_k$$

dove:

Z_k è il modulo dell'impedenza della rete vista dal convertitore alla frequenza $k \cdot 50\text{Hz}$.

In presenza di condensatori di rifasamento l'impedenza in esame è quella del parallelo fra l'induttanza di linea e la capacità degli stessi condensatori; il suo modulo può assumere l'andamento tracciato nella figura 7.

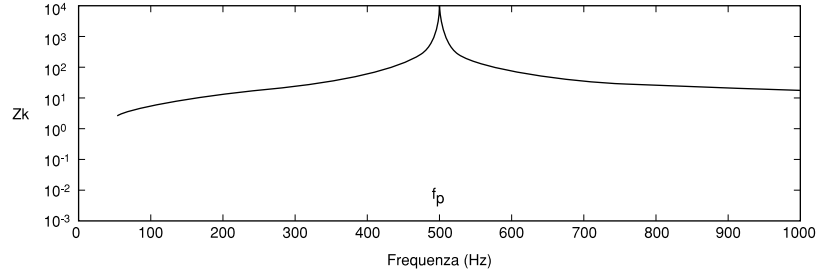


Figura 7: andamento dell'impedenza di rete in presenza di condensatori di rifasamento

Essa evidenzia un fenomeno di risonanza parallelo alla frequenza data da:

$$f_p = \frac{1}{2 \sqrt{L_1 \cdot C_r}}$$

La frequenza f_p dipende pertanto dalle caratteristiche della linea e dai condensatori di rifasamento. I valori di f_p sono ovviamente maggiori di 50Hz, ma comunque rientrano spesso nel campo in cui cadono le frequenze armoniche più significative dei convertitori.

Si comprende inoltre che le armoniche di corrente di frequenza prossima a quella di risonanza parallelo causano, ampie tensioni armoniche e, di conseguenza, intense e spesso intollerabili correnti armoniche nei condensatori di rifasamento e nella linea di alimentazione. Si ha in definitiva un'amplificazione delle armoniche di corrente di frequenza prossima a quella di risonanza parallelo, con la manifestazione di consistenti deformazioni della tensione.

Per evitare questi inconvenienti, in applicazioni di non grande potenza, si dispongono in serie ai condensatori di rifasamento adeguate induttanze L_r così da comporre con i condensatori C_r un ramo LC serie come schematizzato nel riquadro della figura 8.

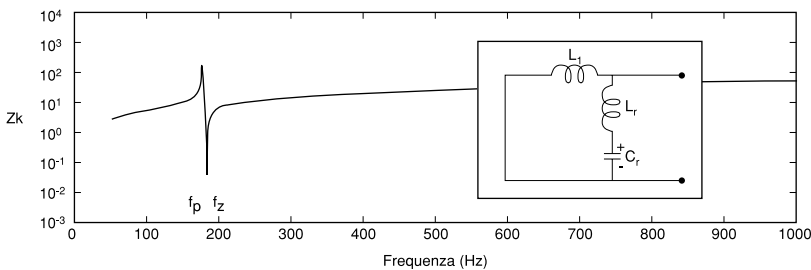


Figura 8: andamento dell'impedenza di rete in presenza di condensatori di rifasamento e con induttanza in serie

L'induttanza L_r viene scelta in modo da avere la frequenza di risonanza della serie LC ad un valore inferiore a quella della più bassa frequenza armonica, di solito fissata intorno ai 200Hz, e comunque è data dalla relazione:

$$f_z = \frac{1}{2 \sqrt{L_r \cdot C_r}}$$

Ricordando che in un bipolo reattivo le frequenze di risonanza serie e parallelo (risonanza e antirisonanza) si succedono alternandosi, l'andamento risultante del modulo dell'impedenza equivalente vista dal convertitore risulterà in definitiva del tipo di figura 8; si può dimostrare che la frequenza vale:

$$f_p' = f_z \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f_z}{f_p}\right)^2}}$$

Il dimensionamento di L_r è eseguito in base alla relazione precedente dopo aver fissato C_r , in accordo con le esigenze di rifasamento ed aver scelto un valore f_z per cui f_p' sia sufficientemente distante dalle frequenze armoniche, così da non innescare esaltazioni di alcuna componente armonica di tensione e di corrente. Si osservi che mentre f_z dipende solo dai parametri del sistema di rifasamento, f_p' dipende anche, attraverso f_p , dai parametri della rete che di solito sono più incerti e variabili.

FILTRAGGIO DELLE CORRENTI ARMONICHE

La presenza di correnti non sinusoidali negli impianti industriali, produce fenomeni indesiderati e in alcune situazioni vere e proprie anomalie di funzionamento, che sono tanto maggiori quanto maggiore è l'intensità delle componenti armoniche.

Nel caso di impianti industriali in cui le potenze dei carichi possono essere anche di alcune centinaia di kVA e le eventuali componenti armoniche di corrente dell'ordine di diverse decine o di centinaia di ampere, le condizioni di funzionamento potrebbero non essere accettabili: se ad esempio si deve dimensionare un quadro automatico di rifasamento, potrebbe non essere sufficiente realizzare un quadro capace di evitare l'esaltazione delle componenti armoniche, ma si deve anche operare una vera e propria azione di eliminazione delle armoniche.

FILTRI PASSIVI

I filtri passivi costituiscono il tradizionale mezzo di risoluzione dei problemi di contenimento dei disturbi causati dai carichi non lineari e sono collegati in parallelo al carico da filtrare.

L'apparecchiatura si compone di più rami LC in ognuno dei quali ciascun gruppo di condensatori è collegato in serie con una induttanza dimensionata per avere la corrispondente frequenza di risonanza coincidente con una delle frequenze armoniche di interesse. Il sistema così composto costituisce un percorso preferenziale attraverso il quale le correnti armoniche trovano una via di richiusura e non interessano la rete a monte.

Come ricordato, l'inserzione di filtri passivi nella rete modifica l'impedenza della rete alle diverse frequenze ed altera la risposta in frequenza dell'impianto elettrico. Quindi è una operazione da eseguire con cautela perché potrebbe generare fenomeni di risonanza, cioè un'esaltazione dei disturbi e degli effetti negativi ad essi connessi, anziché una loro attenuazione.

Un altro aspetto particolare legato al filtraggio passivo è che il filtro rappresenta un corto circuito per la armonica a cui è accordato (se si trascurano le resistenze del filtro stesso) e nella scelta del dispositivo più idoneo si deve valutare la possibilità che esso possa assorbire correnti armoniche generate anche da altri carichi inquinanti presenti nella rete. D'altro canto, per la loro semplicità di realizzazione e per l'economicità, i filtri passivi sono ad oggi gli elementi di più largo impiego per la riduzione dei disturbi nelle reti di distribuzione.

In definitiva l'utilizzo pratico di filtri passivi non può prescindere da una serie di problematiche impiantistiche che devono essere note per determinare correttamente le prestazioni.

- Le caratteristiche del filtraggio dipendono dall'impedenza della rete. Anche se il filtro è perfettamente accordato alla frequenza che si vuole eliminare, presenterà sempre una certa resistenza. La corrente armonica fluirà in parte verso la rete in quantità tanto maggiore quanto minore sarà l'impedenza delle rete rispetto a quella del filtro. In altri termini l'effetto filtrante è tanto minore quanto maggiore è la potenza di corto circuito della rete.
- Il funzionamento dei filtri risente della presenza di eventuali ulteriori utenze distorcenti allacciate ad altri nodi della rete che potrebbero causare condizioni di sovraccarico.
- I filtri passivi non sono adatti per carichi con correnti rapidamente variabili nel tempo. A meno di non fare sistemi elettronici di inserzione in grado di regolare il numero di elementi inseriti, il ritardo tra un repentino aumento di carico e l'inserzione del nuovo gradino e dell'ordine di qualche decina di secondo e quindi non risultano idonei per carichi in cui la corrente varia continuamente e rapidamente nel tempo.

Queste problematiche possono essere in parte risolte con l'adozione di alcuni accorgimenti specifici.

L'utilizzazione di una induttanza di linea posta all'ingresso del filtro consente di imporre una impedenza minima alla rete effettuando così la ripartizione desiderata delle correnti armoniche fra rete e filtro.

Un esempio di questa applicazione è rappresentata nella figura 9: filtri fissi.

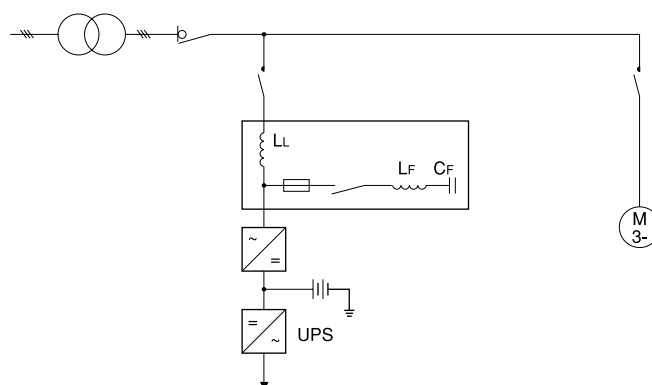


Figura 9: schema di collegamento di un filtro per armoniche generate da U.P.S.

Come si può notare dal tipo di collegamento del filtro rispetto al carico, l'induttanza di linea è percorsa dalla corrente di carico; di conseguenza questo accorgimento e tipologia di filtri si adottano con carichi caratterizzati da un regime di funzionamento praticamente costante, esempio tipico sono i gruppi di continuità, e con potenza sino a qualche centinaio di kVA.

Nel caso di carichi di grossa potenza o con assorbimenti di corrente variabili nel tempo si possono utilizzare più sezioni o rami filtro opportunamente collegati in parallelo e comandati da un segnale amperometrico.

In questo modo è possibile ottenere un sistema modulare capace di adeguarsi alla variazione del carico ed al limite in grado di essere facilmente adattato a nuove situazioni o configurazioni impiantistiche con distorsioni armoniche maggiori di quelle previste inizialmente a causa della installazione di nuove apparecchiature.

Al fine di distribuire uniformemente la corrente armonica tra un gradino di filtro ed l'altro ed evitare sovraccarichi a causa delle inevitabili differenze tra i valori di capacità e di induttanza dei gruppi LC, si può utilizzare un secondo contattore che collega in parallelo i gruppi come si vede in figura 10.

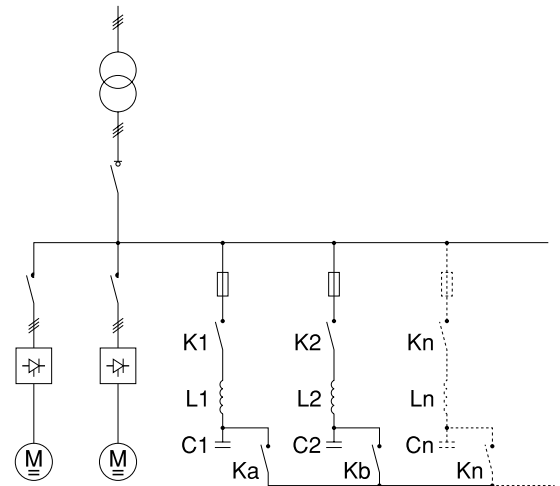


Figura 10: schema semplificato di un filtro modulare

Con questo accorgimento i diversi gradini/rami LC hanno tutte le induttanze e tutti i condensatori collegati in parallelo e quindi si potranno compensare le differenze costruttive dei diversi componenti.

È disponibile la nuova versione **Filtri armonici modulari ad inserzione statica**, particolarmente adatta per carichi con correnti rapidamente variabili nel tempo, dove si richiede una compensazione filtro rapida con numero elevatissimo di inserzioni/disinserzioni dei moduli filtro.

Gli interruttori statici sono basati su tecnologia tryac ad inserzione zero-crossing di tensione tra i terminali dei tryac. Questa tecnica permette di rendere il sistema estremamente rapido.

La soluzione compensatori filtri armonici modulari ad inserzione statica è una versione ibrida che, a differenza dei filtri attivi, presenta il vantaggio di non avere limiti in potenza.