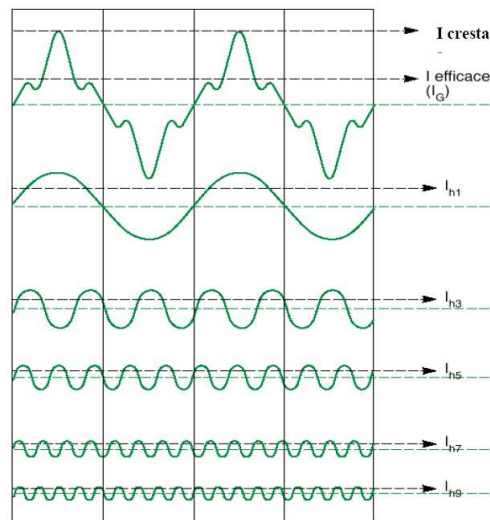


Power Quality: le armoniche negli impianti elettrici



dott. ing. Stefano Comuzzi

*Consulente Elettrotecnico. Coordinatore della Commissione Impianti dell'Ordine Ingegneri di Udine.
Docente in ruolo di "Elettrotecnica e Misure Elettriche" presso il Dipartimento di Elettrotecnica ed Automazione
dell'Istituto Tecnico Industriale "Arturo Malignani" di Udine*

Udine, 19 maggio 2006

Premessa

La tematica trattata in oggetto è di primaria attualità, in quanto strettamente legata alla cosiddetta "power quality"; sono note infatti le situazioni a volte critiche e i disservizi negli impianti elettrici causati dalle armoniche.

Si rammenta che la presenza di armoniche in rete è indice di deformazione della corrente o della tensione; ciò significa che la distribuzione dell'energia elettrica avviene con qualità non ottimale.

In tal caso le utenze più sensibili possono essere soggette a malfunzionamenti e l'intero impianto essere chiamato a sollecitazioni aggiuntive.

Tuttavia, rispetto a quanto accadeva in un recente passato, non è solo il settore industriale a risentirne; ora gli impianti elettrici nel terziario e nel civile sono frequentemente soggetti a tale "inquinamento", con conseguenze in certi casi peggiori.

L'argomento è abbastanza vasto e complesso: in questa sede verranno trattati, in maniera forzatamente schematica, i seguenti punti:

1. *Richiami di teoria;*
2. *Principali disturbi provocati dalle armoniche;*
3. *Generatori di armoniche;*
4. *Il problema dell'amplificazione per risonanza;*
5. *Impatto economico;*
6. *Possibili soluzioni di base – rimedi e azioni correttive;*
7. *Un esempio pratico: il problema del rifasamento;*

1) Richiami di teoria

1a) Generalità sulle grandezze periodiche non sinusoidali

Le conoscenze e i concetti basilari dell'ingegneria elettrica vengono spiegati ammettendo valida l'ipotesi che molte delle grandezze siano sinusoidali; tale presupposto a volte risulta non valido, e pertanto la trattazione di particolari fenomeni deve venire sviluppata in modo più elaborato.

Una grandezza $f(t)$ dicesi periodica quando risulta soddisfatta la relazione $f(t) = f(t+T)$.

E' noto dal teorema di Fourier che una grandezza periodica di periodo T e di pulsazione $\omega = 2\pi/T$, avente forma d'onda qualunque, è sempre scomponibile nella somma di un termine costante e di un numero infinito di termini sinusoidali aventi ognuno ampiezza, fase e frequenza diverse.

Negli infiniti termini della serie, vi è uno che ha la stessa pulsazione (o frequenza) del fenomeno dato: tale termine prende il nome di *fondamentale*, mentre gli altri (detti *armoniche*) sono caratterizzati dal fatto di avere una pulsazione multipla positiva pari e/o dispari del valore della pulsazione della fondamentale.

Il valore costante eventualmente presente (definibile anche termine a pulsazione zero) rappresenta il valore medio della grandezza, termine nullo quando la grandezza risulta alternativa.

1b) Analisi armonica e parametri caratteristici

Eeguire l'analisi armonica di una grandezza y come sopra descritta consiste nel determinare l'ampiezza e la fase di ciascun termine armonico; si ricorda che la fase dell'armonica serve per individuare il punto di zero (crescente) rispetto all'origine scelta.

In maniera più sintetica, solitamente viene proposta la forma:

$$y(t) = Y_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} Y_n \text{sen}(n\omega t - \varphi_n)$$

Ad esempio, eseguendo l'analisi armonica sulla funzione tensione $v(t)$ di un impianto, la fondamentale avrà frequenza pari a 50 Hz, l'armonica di ordine due avrà una frequenza di 100 Hz e così via.

Un segnale deformato può quindi essere considerato come la somma di un insieme di armoniche.

I principali parametri caratteristici delle grandezze periodiche non sinusoidali sono i seguenti:

↪ *il valore efficace*, che è definito dall'espressione:

$$Y = \sqrt{Y_m^2 + \frac{1}{2}(Y_{1M}^2 + Y_{2M}^2 + Y_{3M}^2 + \dots)} = \sqrt{Y_m^2 + Y_1^2 + Y_2^2 + Y_3^2 + \dots}$$

esso risulta essere pertanto pari alla radice quadrata della somma dei quadrati dei valori efficaci dei singoli termini, compreso quello esprimente il valore medio;

↪ *il residuo di armoniche*, il quale esprime il valore efficace delle sole armoniche:

$$R = \sqrt{Y_2^2 + Y_3^2 + Y_4^2 + \dots}$$

↳ *la distorsione totale*, che rappresenta il rapporto tra il valore efficace delle sole armoniche (residuo) e quello della fondamentale; la seguente definizione è la più usata (IEC 61000-2-2):

$$D_t = \frac{R}{Y_1} = \sqrt{\left(\frac{Y_2}{Y_1}\right)^2 + \left(\frac{Y_3}{Y_1}\right)^2 + \dots}$$

Per quanto riguarda le potenze, vengono utilizzate le seguenti espressioni:

$$P = V_m I_m + V_1 I_1 \cos \varphi_1 + V_2 I_2 \cos \varphi_2 + \dots = V_m I_m + \sum_1^{\infty} V_n I_n \cos \varphi_n$$

per la potenza attiva, mentre per la potenza reattiva risulta essere:

$$Q = V_1 I_1 \sin \varphi_1 + V_2 I_2 \sin \varphi_2 + \dots = \sum_1^{\infty} V_n I_n \sin \varphi_n$$

Per quanto riguarda la *potenza apparente*, essa è ancora espressa come

$$S = VI \text{ (monofase) oppure } S = \sqrt{3}VI \text{ (trifase)}$$

tuttavia si riscontra che :

$$S \neq \sqrt{P^2 + Q^2}$$

in quanto bisogna tenere conto della *potenza deformante D*; si ha quindi

$$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2$$

Il termine D risulta chiaramente nullo in regime sinusoidale: a volte viene considerato un indice di armonicità, espresso in percentuale, che viene valutato nel modo seguente:

$$I\% = \frac{S^2 - (P^2 + Q^2)}{S^2} \cdot 100$$

Il *fattore di potenza PF (Power Factor)* è definito come il rapporto tra la potenza attiva P e la potenza apparente S assorbite da un utenza o da un impianto:

$$PF = \frac{P}{S}$$

Spesso viene confuso con il $\cos \varphi$, che invece è dato dalla relazione:

$$\cos \varphi = \frac{P_1}{S_1}$$

dove P_1 e S_1 sono rispettivamente la potenza attiva e apparente che si avrebbero ipotizzando nullo il contenuto armonico: PF e $\cos\phi$ sono uguali solo in caso di assenza di armoniche.

Si può dimostrare che esiste anche la seguente relazione tra PF, $\cos\phi$ e THD:

$$PF = \frac{\cos\phi_1}{\sqrt{1 + THD_i^2}}$$

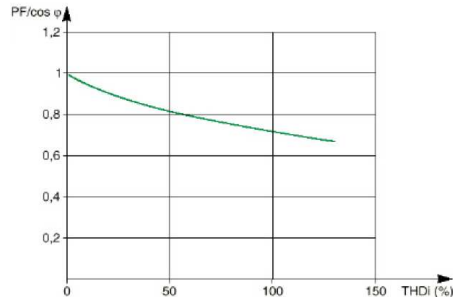


Figura 1 - andamento del valore PF/cosφ in funzione del tasso di distorsione armonica di corrente

Il *fattore di cresta* k è il rapporto tra il valore di cresta ed il valore efficace; ad esempio per una corrente si ha:

$$k = \frac{I_{cresta}}{I_{eff}}$$

Per un segnale sinusoidale puro, tale rapporto è pari a $\sqrt{2}$, in caso di segnali distorti può assumere valori inferiori o superiori.

Il calcolo del fattore di cresta è importante quando le armoniche presenti portano ad una forma d'onda particolarmente lontana dalla sinusoidale; in casi particolari, può assumere valori anche superiori a 5.

Se il fattore di cresta è molto elevato significa che l'utenza è chiamata a sopportare un sovraccarico istantaneo ad ogni semionda, e ciò potrebbe dare origine anche ad interventi intempestivi degli organi di protezione.

1c)..... Considerazioni sui singoli indicatori

Il THD in tensione caratterizza la deformazione della forma d'onda della tensione. Se tale indice ha valore è inferiore al 5%, valore da considerarsi normale, non è necessario prendere alcun provvedimento.

Se il suo valore è compreso tra il 5 e l'8%, significa che l'impianto è caratterizzato da una forte armonicità e con molta probabilità vi sono dei malfunzionamenti, nell'impianto. Se il valore supera l'8%, è necessario prendere provvedimenti (sistemi di compensazione) per evitare malfunzionamenti.

Il THD in corrente caratterizza la deformazione della forma d'onda della corrente. Se il suo valore è inferiore al 10% si è nell'ambito della normalità; se invece si è tra il 10 e il 50% significa che si è in presenza di un impianto con una sensibile armonicità che potrebbe causare surriscaldamenti: può rendersi necessario il sovradimensionamento dei conduttori.

Se il THD in corrente è maggiore del 50% siamo in presenza di un impianto fortemente perturbato che può avere malfunzionamenti significativi: è necessario procedere ad un'analisi dell'impianto per realizzare le opportune contromisure.

Il fattore di cresta k è utilizzato per capire se la corrente assorbita dell'impianto possa dare problemi all'alimentazione (gli alternatori possono avere problemi a fornire correnti con elevato fattore di cresta: necessitano un declassamento).

Ad esempio le utenze di tipo informatico sono caratterizzate da correnti assorbite che presentano un fattore di cresta anche pari a 5.

Lo spettro in frequenza è utilizzato per avere un'indicazione visuale della deformazione del segnale (corrente, tensione...) considerato.

1d)..... Proprietà delle forme d'onda

Le forme d'onda delle grandezze elettriche allo studio spesso presentano delle simmetrie, le cui peculiarità consentono di eliminare a priori alcuni termini dello sviluppo della serie, semplificando così l'analisi armonica.

Si riportano alcuni esempi, alcuni dei quali possono presentarsi contemporaneamente:

1. la grandezza presenta un andamento tale che l'area positiva è uguale a quella negativa: è nullo quindi il termine A_0 e la grandezza è alternativa;
2. il semiperiodo positivo e quello negativo hanno lo stesso andamento nel tempo, a parte il segno (esiste simmetria della semionda): mancano in tal caso le armoniche pari e il valore medio;
3. la grandezza presenta caratteri di simmetria rispetto all'asse verticale, questo avviene se $y(t) = y(-t)$: in questo caso saranno assenti tutti i termini in seno;
4. la grandezza presenta caratteri di antisimmetria rispetto all'asse verticale, cioè $y(t) = -y(-t)$: in tal caso risulteranno assenti i termini in coseno e il termine costante.

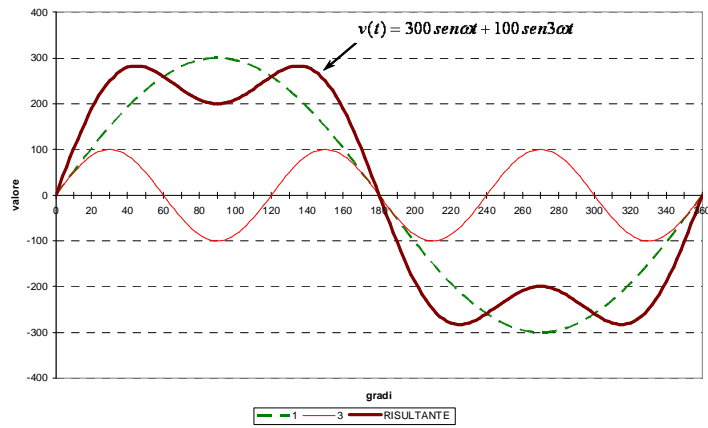


Figura 2 - Effetto di una terza armonica "in fase"

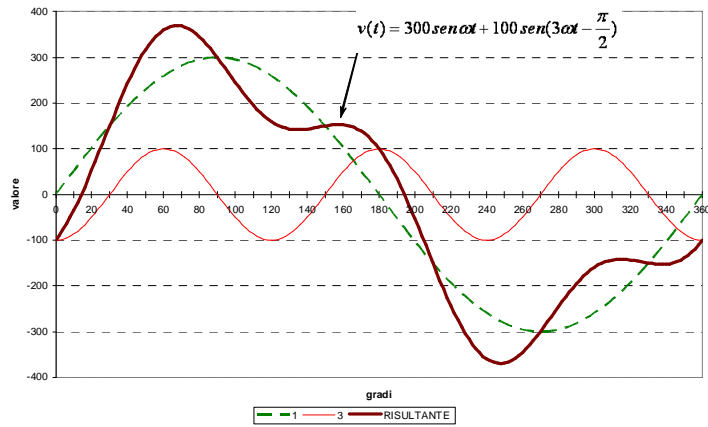


Figura 3 - Effetti di una terza armonica "in quadratura ritardo"; si noti lo spostamento degli zeri

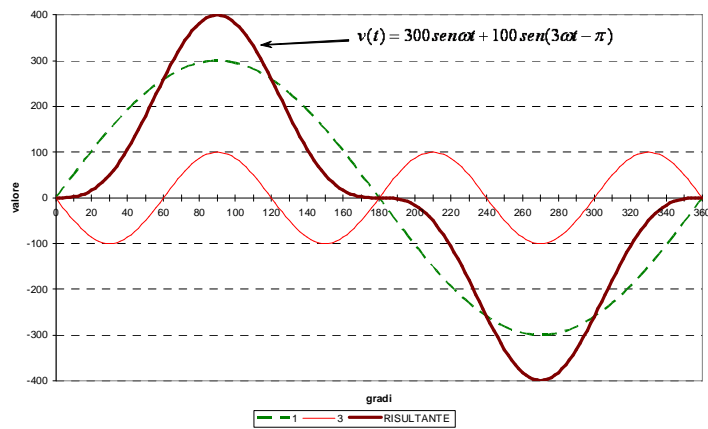


Figura 4 - Effetti di una terza armonica "in opposizione"

Va comunque sottolineato che, come dimostra la pratica, le ampiezze dei termini armonici diminuiscono all'aumentare dell'ordine dell'armonica.

E' quindi evidente che ha senso arrestare lo sviluppo in serie dopo un ragionevole numero di termini, in quanto il contributo dei successivi diventa via via meno significativo; ciò va ovviamente valutato in relazione all'approssimazione che si vuole raggiungere.

Come si evince da quanto sopra, eseguire l'analisi completa di una grandezza assegnata non è cosa semplice; fortunatamente le moderne tecnologie hanno permesso la costruzione di sofisticati strumenti - detti analizzatori di armoniche - che consentono un pressoché immediato monitoraggio del segnale da studiare.

Tali strumenti - richiesti sempre di più sul mercato anche per controllare e verificare l'omologazione CE dei dispositivi elettrici - sono appunto in grado di scomporre in serie di Fourier il segnale campionato, fornendo i valori delle ampiezze della fondamentale e delle armoniche superiori con relativo angolo di fase; è possibile inoltre una comoda visualizzazione del segnale sia nel dominio del tempo che nel dominio della frequenza.

Per quanto riguarda le approssimazioni, le strumentazioni oggi disponibili supportano tranquillamente un'analisi fino alla 25^a armonica, quelle più sofisticate anche la 50^a.

Va tuttavia sottolineato che, nella pratica, i risultati delle misurazioni generalmente non risultano presentare armoniche superiori alla 21^a su linee dedicate, mentre sulle linee principali di solito non si supera la 13^a, grazie all'effetto bilanciamento dovuto alla presenza di carichi lineari.

2) Principali disturbi provocati da armoniche di tensione e di corrente

Le armoniche di tensione e di corrente sovrapposte alla fondamentale hanno effetti combinati sugli equipaggiamenti e dispositivi allacciati alla rete elettrica.

2a) Effetti istantanei

Le armoniche di tensione possono disturbare gli apparati di controllo usate nei sistemi elettronici, si pensi agli errori indotti dallo spostamento dello zero, oppure ai disturbi su dispositivi di controllo che utilizzano frequenze prossime a quelle delle componenti armoniche.

Le forze elettrodinamiche prodotte dalle correnti istantanee contenenti armoniche causano vibrazioni e disturbi acustici, specialmente nei dispositivi elettromagnetici (trasformatori, reattori etc.).

Inoltre la presenza di armoniche nei campi rotanti può produrre vibrazioni nelle macchine rotanti, a causa di coppie pulsanti.

Si possono inoltre osservare disturbi qualora dispositivi di comunicazioni o controllo corrano parallelamente a circuiti di distribuzione di potenza attraversati da correnti distorte; bisogna quindi tenere in considerazione la lunghezza dei percorsi paralleli, la distanza dei circuiti e l'ordine delle armoniche (l'accoppiamento aumenta con la frequenza).

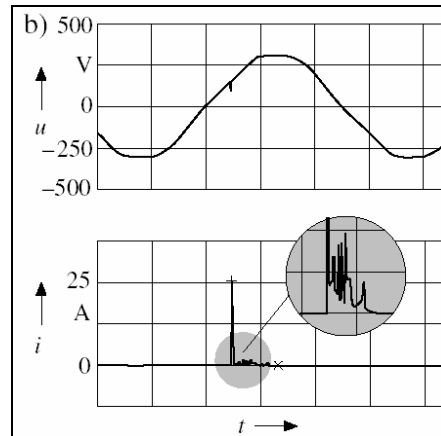


Figura 5 - Corrente d'inserzione di una lampada fluorescente compatta ed effetti sulla tensione (Università di Budapest)

2b) Effetti a lungo termine

Riscaldamento nei condensatori: le perdite da riscaldamento sono approssimativamente proporzionali al quadrato del valore efficace della corrente: essi sono particolarmente sensibili ai sovraccarichi, dovuti sia alle tensioni più elevate che alla presenza di armoniche; il calore prodotto può portare alla scarica del dielettrico.

Riscaldamento dovuto a perdite addizionali nelle macchine: sono presenti perdite supplementari nelle macchine rotanti e nei trasformatori dovute a effetto pelle, isteresi e correnti parassite. Sovraccarico, vibrazioni e invecchiamento precoce.

Riscaldamento nei cavi e negli equipaggiamenti elettrici: le perdite nei cavi sono incrementate qualora circolino correnti ad elevato contenuto armonico, portando ad un aumento di temperatura, e quindi ad una diminuzione della durata di vita dell'isolante. Sovraccarico nel conduttore di neutro (nel quale circola la somma delle correnti di terza armonica).

Tali perdite dipendono da:

- aumento del valore efficace della corrente;
- aumento della resistenza apparente della sezione dovuta all'effetto pelle;
- aumento delle perdite dielettriche dell'isolante con la frequenza, se il cavo è soggetto a distorsioni di tensione;
- fenomeni legati all'effetto prossimità;

Generalmente parlando, tutti gli equipaggiamenti elettrici alimentati con tensioni distorte o attraversati da correnti deformate mostrano un aumento delle perdite e – se necessario – devono essere declassati.

Nella figura 6 viene riportato - a titolo esemplificativo - il declassamento da applicare nei trasformatori in funzione della percentuale di carico non lineare.

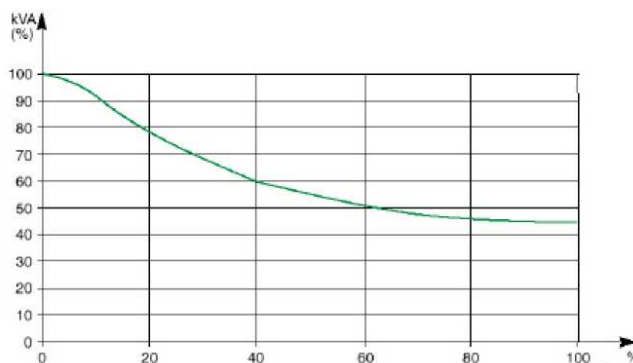


Figura 6 - Declassamento percentuale nei trasformatori in funzione della percentuale di carico non lineare

Odd harmonics non multiples of 3		Odd harmonics multiples of 3		Even harmonics	
Harmonic order n	Harmonic voltage %	Harmonic order n	Harmonic voltage %	Harmonic order n	Harmonic voltage %
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1.5	4	1
11	3.5	15	0.3	6	0.5
13	3	21	0.2	8	0.5
17	2	>21	0.2	10	0.5
19	1.5			12	0.2
23	1.5			>12	0.2
25	1.5				
>25	$0.2+0.5x25/n$				

Figura 7 - Livelli di compatibilità per armoniche di tensione in reti di distribuzione B.T. (IEC 61000-2-2)

3) Generatori di armoniche

Come detto in premessa, i dispositivi che danno luogo ad armoniche sono presenti sia nel settore industriale che nel terziario che in ambito domestico: le armoniche sono dovute, essenzialmente, a carichi non lineari ovvero quelli che danno luogo ad assorbimento di corrente con andamento differente dalla tensione di alimentazione.

Le tipologie di carico "non lineare" sono: l'elettronica di potenza (raddrizzatori, invertitori, ecc), ma anche le saldatrici, i forni ad arco, i variatori di velocità, le apparecchiature da ufficio quali il fax e il PC, i monitor, i dispositivi affetti da saturazione (trasformatori) possono dare luogo ad armoniche.

Si riportano di seguito alcuni esempi.

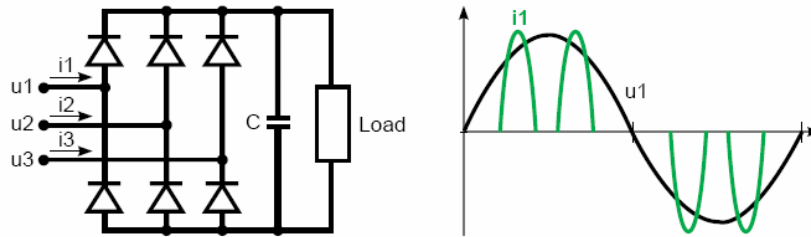


Figura 8 - Esempio di ponte di conversione e forme d'onda associate; le armoniche sono di ordine dispari

Le lampade a scarica sono un classico esempio di generatori di armoniche di corrente; in certi casi l'ampiezza della terza armonica di corrente può raggiungere valori elevati in alcuni tipi di moderne lampade fluorescenti compatte.

In tal caso è importante ricordare che il conduttore neutro è caricato dalla somma delle terze armoniche, e pertanto può essere danneggiato causa eccessivo riscaldamento se non adeguatamente dimensionato.

I forni ad arco sono utilizzati nell'industria dell'acciaio: essi possono essere di tipo :

AC - l'arco è non lineare, asimmetrico e instabile mentre genera un spettro che include armoniche sia di ordine pari che dispari; lo spettro dipende dal tipo di forno, dalla sua potenza e dal tipo di trattamento termico;

DC - l'arco è alimentato da un convertitore AC/DC ed è più stabile che nel caso precedente; l'analisi spettrale della corrente è simile a quella di un raddrizzatore, dando luogo ad uno spettro continuo più contenuto del caso AC.

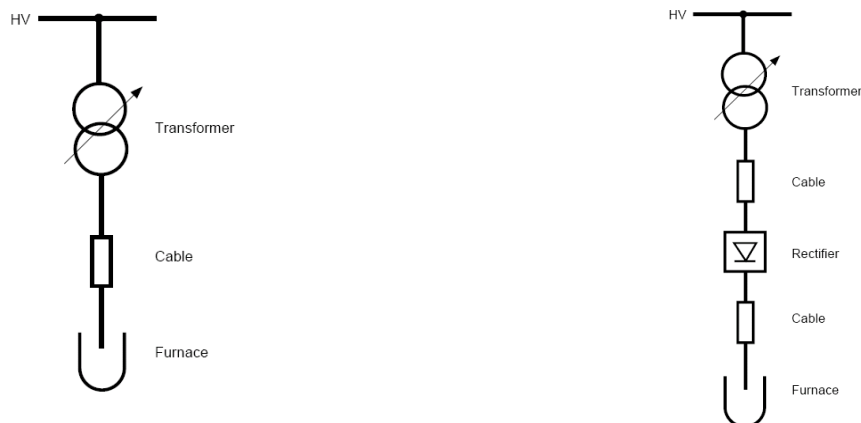


Figura 9 - Schema di forno ad arco alimentato in AC (sinistra) e in DC (destra)

Gli alternatori che alimentano carichi non lineari devono essere declassati a causa delle perdite supplementari causate dalle correnti armoniche. Tale declassamento è nell'ordine del 10% se il 30% del carico totale è costituito da utenze non lineari: di qui la necessità di un sovradimensionamento.

Gruppi statici - Come già accennato, i dispositivi informatici hanno assorbimento di corrente caratterizzata da un elevato fattore di cresta, che può tradursi in un sovraccarico per i gruppi statici, se non opportunamente declassati.

4) Il problema dell'amplificazione per risonanza

Vengono considerati i due seguenti casi:

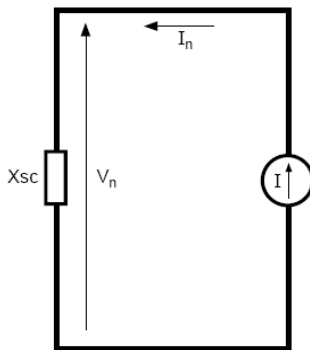
- a) reti senza condensatori di rifasamento
- b) reti in presenza di condensatori di rifasamento

Caso a)

In assenza di banchi di condensatori, i disturbi armonici sono limitati e proporzionali alla corrente degli apparecchi disturbanti; nel range di frequenze relazionate alle armoniche, la rete resta induttiva.

La sua reattanza è proporzionale alla frequenza e, in prima approssimazione, gli effetti del carico e della resistenza sono trascurabili; l'impedenza di rete - vista dal nodo - è quindi limitata dalla reattanza di cortocircuito X_{sc} nel nodo considerato.

Il livello di tensioni armoniche può essere valutato dalla potenza degli apparati disturbanti e dalla potenza di cortocircuito nel nodo in cui l'apparecchiatura disturbante è connessa



Posta In la corrente dell'apparecchio disturbante, si ha :

$$X_{sc_n} = L_{cc} * \omega_n = L_{sc} * n * 2\pi f_1$$

quindi

$$V_n = X_{sc_n} I_n = L_{sc} * n(2\pi f_1) * I_n$$

Figura 10 - La tensione armonica V_n è proporzionale alla corrente I_n iniettata dall'apparecchio disturbante

I disturbi armonici generalmente rimangono accettabili fino a che i carichi disturbanti non superano un certo livello di potenza.

Nota

In realtà, la reattanza armonica della rete X senza condensatori (essenzialmente una rete di distribuzione) rappresentata da L_{sc_n} , può essere considerata proporzionale alla frequenza solo in prima approssimazione.

Per questa ragione, l'impedenza di cortocircuito della rete è generalmente moltiplicata per un fattore due o tre per i calcoli, specialmente quando ci sono dubbi sulle caratteristiche della rete.

L'impedenza armonica della rete è costituita infatti da diversi componenti come l'impedenza di cortocircuito della rete di distribuzione, dei cavi, delle linee aeree, dei trasformatori ed di altri carichi.

Caso b)

A certe frequenza, esiste risonanza tra batterie di condensatori e reattanza della rete vista ai loro morsetti; come risultato si ha amplificazione delle armoniche di corrente e tensione se l'ordine della risonanza è lo stesso di quello delle armoniche di corrente iniettate dall'apparecchio disturbante.

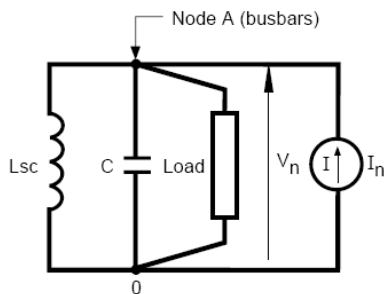
Questo fenomeno è noto come risonanza parallelo, ed è un problema assai serio negli impianti; in prima approssimazione, la rete può essere rappresentata come mostrato in figura, ove:

L_{sc} = induttanza di cortocircuito della rete a monte vista dai morsetti dei condensatori e del carico disturbante;

C = condensatori;

I_n = corrente del carico disturbante;

a : harmonic electrical representation of a phase



b : single-line diagram

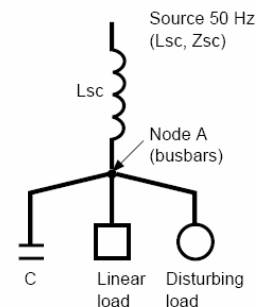


Figura 11 - Circuito equivalente per un circuito soggetto ad armoniche di corrente in presenza di condensatori

si ottiene pertanto l'espressione : $V_n = Z_{AO} * I_n$

Se un'armonica di corrente I_n di ordine n avente la frequenza pari a quella di risonanza parallelo viene iniettata dall'apparato disturbante, la corrispondente armonica di tensione può essere valutata come $V_n = R I_n$.

Considerando una comune rete industriale elementare, comprendente una batteria di condensatori C alimentati da un trasformatore avente una induttanza di cortocircuito L_T ove L_{sc} rappresenta l'induttanza di cortocircuito della rete di distribuzione a monte, la frequenza di risonanza vale :

$$f_{ar} = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L_{sc} + L_T)C}}$$

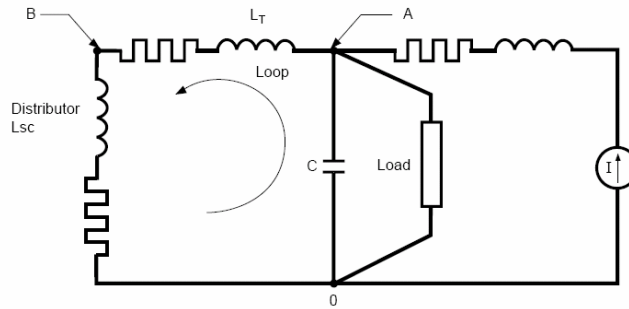


Figura 12 I condensatori e la somma delle impedenze a monte formano un circuito risonante

Siccome $L_{SC} \ll L_T$ l'ordine della risonanza parallelo è praticamente lo stesso se l'impedenza di rete è vista dal punto A o dal punto B; in generale nota la potenza di cortocircuito S_{SC} ai morsetti dei condensatori e la potenza reattiva dei condensatori Q , si ha:

$$n_{ar} = \sqrt{\frac{S_{SC} (MVA)}{Q (M \text{ var})}}$$

Come conseguenza pratica, se l'ordine di armonica iniettata dall'apparato disturbante coincide o è vicina a quello di risonanza, c'è un rischio di sovratensioni armoniche, specialmente se la rete lavora a bassi carichi.

Le correnti armoniche allora diventano considerevolmente elevate ed indubbiamente presentano un pericolo per i condensatori; inoltre se l'ordine di risonanza parallelo corrisponde alla frequenza di corrente portante dell'apparecchiatura di controllo, c'è rischio di disturbi.

L'impedenza di cortocircuito della rete raramente è conosciuta con precisione e, inoltre, può variare considerevolmente, quindi con conseguenti grandi variazioni della frequenza di risonanza parallelo.

È necessario quindi da stabilizzare questa frequenza ad un valore che non corrisponda alle frequenze delle correnti armoniche iniettate. Ciò si concretizza collegando un reattore in serie con il condensatore. Il circuito generato così allora è rappresentato in figura sottostante, ove $V_n = Z_{AO} I_n$

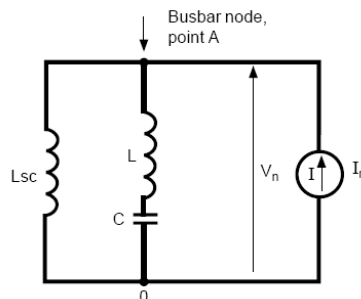


Figura 13 - Reattanza collegata in serie con la capacità

Compare quindi una risonanza serie tra L e C; in antitesi a questa risonanza, che dà un'impedenza minima, la risonanza parallelo è spesso indicata come antirisonanza e la relativa frequenza vale:

$$f_{ar} = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L_{SC} + L)C}}$$

Il valore di L_{SC} è generalmente piccolo rispetto a L, da cui si deduce che la presenza dell'induttanza L rende la frequenza f_{ar} meno sensibile alle variazioni dell'induttanza di cortocircuito L_{SC} .

5) Impatto economico

L'influenza economica legata alla presenza di armoniche può essere così schematizzata:

- aumento delle perdite - la presenza di perdite supplementari di energia pesa evidentemente sui costi d'impianto, anche per l'eventualità di dover sottoscrivere contratti più gravosi o comunque con tariffe più penalizzanti, come accade in certi paesi;
- necessità di sovradimensionamenti - l'esigenza di dover sovradimensionare conduttori e apparecchiature elettriche può rappresentare un onere aggiuntivo non indifferente;
- costi di fermo impianto - spese aggiuntive eventuali conseguenti all'intervento intempestivo delle protezioni;
- diminuzione della durata di vita dei materiali - a titolo orientativo, uno studio della Canadian Electrical Association ha dimostrato che una tensione di alimentazione con THD pari al 10% causa una diminuzione della durata di vita:
 - del 32,5% per gli apparecchi monofase
 - del 18% per quelli trifase
 - del 5% per i trasformatori

Per avere delle apparecchiature che garantiscano la durata di vita necessaria bisogna ricorrere, ancora una volta, al sovradimensionamento.

6) Possibili soluzioni di base - rimedi e azioni correttive:

6a) Possibili soluzioni di base

Corretto posizionamento dei carichi distorcenti

Va innanzitutto rilevato che la perturbazione armonica provocata da un determinato apparecchio è tanto maggiore quanto più è basso il livello di corto circuito del punto dell'impianto in cui viene collegato.

Prescindendo da considerazioni di carattere economico, i carichi inquinanti è bene siano collegati quanto più a monte possibile, quindi in prossimità dell'alimentazione; un tale collegamento ridurrà anche le perdite aggiuntive nei cavi.

Ancora, è bene raggruppare i carichi inquinanti (ad esempio prevedendo un sistema di sbarre dedicato per la loro alimentazione); ciò è vantaggioso anche per il fatto che, così facendo, aumenta la possibilità che le armoniche prodotte dai diversi apparecchi inquinanti si elidano reciprocamente.

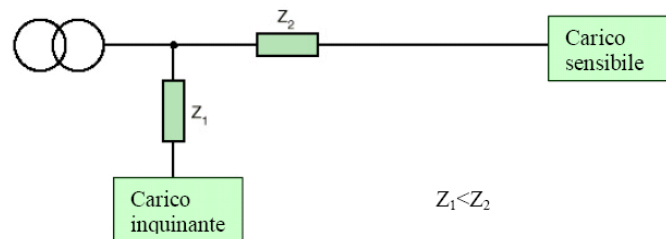


Figura 14 - Corretto collegamento dei carichi inquinanti

Alimentazioni dedicate

Un ulteriore miglioramento può essere ottenuto sdoppiando l'alimentazione, dedicando cioè un trasformatore (o più di uno) ai carichi inquinanti; inevitabilmente, tale opzione comporta dei costi impiantistici più elevati ma - in taluni casi - è quasi una scelta obbligata.

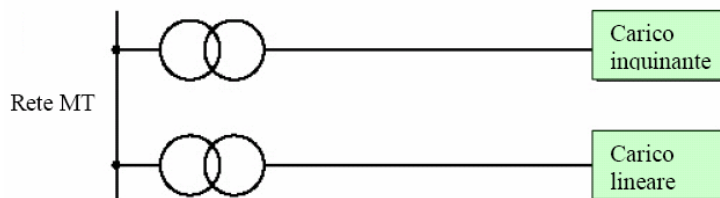


Figura 15 - Sdoppiamento dell'alimentazione per diminuire gli effetti dei carichi lineari

È anche possibile utilizzare trasformazioni con particolari gruppi orari (ovvero le modalità di collegamento degli avvolgimenti) per eliminare determinate armoniche senza ricorrere ad altri sistemi di compensazione.

Ad esempio:

- Il gruppo orario Dyd arresta le armoniche di ordine 5 e 7
- Il gruppo Dy arresta le armoniche di ordine 3
- Il gruppo orario DZ₅ arresta le armoniche di ordine 5

Nella figura seguente si vede l'utilizzo di un trasformatore a tre avvolgimenti realizzato con appositi gruppi orari in grado di arrestare le armoniche di ordine 5 e 7.

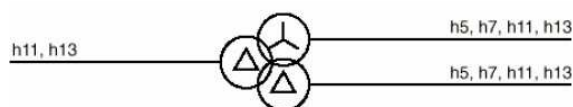


Figura 16 - Utilizzo di trasformatori a tre avvolgimenti per limitare l'impatto delle armoniche

Inserzione di induttanze

L'utilizzo di induttanze permette di limitare i problemi dovuti alle armoniche. L'inserimento di induttanze in linea permette di limitare l'influenza delle armoniche (l'impedenza globale dell'impianto viene aumentata); analogamente si utilizzano induttanze per evitare l'assorbimento di elevate correnti, da parte dei trasformatori, quando vi sono armoniche di ordine elevato.

Schemi di collegamento a terra

Anche lo schema di collegamento a terra ha influenza sull'armonicità dell'impianto. Ad esempio, lo schema TN-C è sconsigliato per un impianto con utenze in grado di generare armoniche: nel conduttore PEN infatti circoleranno le correnti armoniche che potranno dar vita a differenze di diversi volt nel potenziale di riferimento (massa) visto dai differenti apparecchi e ciò può causare malfunzionamenti nel caso di apparecchiature elettroniche sensibili.

E' sicuramente da preferire, in questo senso, lo schema di collegamento TN-S: le correnti armoniche circoleranno nel conduttore di neutro rimando così sgravato il PE ed evitando così i suddetti problemi.

6b) Possibili rimedi e azioni correttive

Filtri Passivi

I filtri passivi sono dei circuiti LC dimensionati per offrire un'impedenza quasi nulla nei confronti dell'armonica di corrente che si vuole eliminare: in questo modo essa circolerà integralmente nel filtro e non più nell'impianto.

Si utilizzano nei seguenti casi:

- per ridurre il THD in tensione e/o in corrente;
- per impianti che hanno utenze inquinanti con potenze totali rilevanti (nell'ordine dei 200kVA o superiori) .
- per impianti che hanno necessità sia di limitare le armoniche che di effettuare compensazione dell'energia reattiva.

Nel caso si vogliano eliminare diverse armoniche, è necessario installare diversi filtri in parallelo.

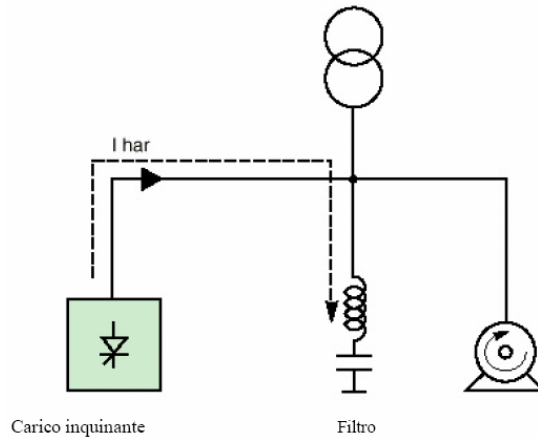


Figura 17 - Applicazione di filtri passivi

Filtri Attivi

Sono dei dispositivi elettronici di potenza che sono installati in serie o in parallelo al carico inquinante.

Tali dispositivi sono in grado di valutare le correnti armoniche generate dall'utenza controllata e iniettare nell'impianto correnti uguali e opposte che le eliminano.

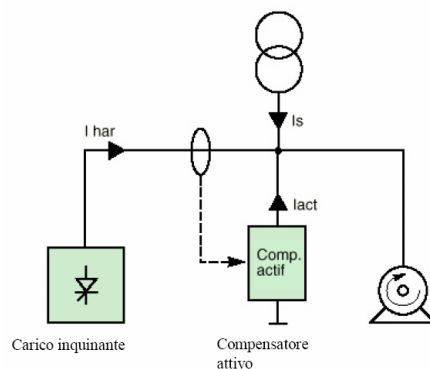


Figura 18 - Utilizzo di filtri attivi

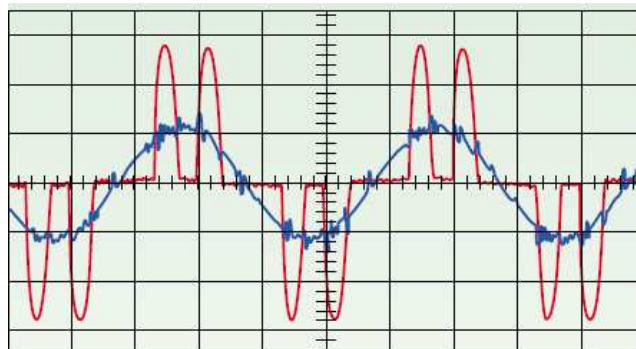


Figura 19 - corrente in un convertitore AC/DC prima e dopo il collegamento del filtro attivo

Generalmente il dispositivo controlla la corrente di linea in tempo reale ed elabora le armoniche misurate come segnali digitali in un DSP (Digital Sign Processor); l'uscita del DSP controlla i moduli di potenza PWM (Pulse Width Modulated) che, attraverso reattanze di linea, iniettano correnti armoniche di fase opposte a quelle che devono essere filtrate.

La corrente armonica I_{har} , generata dal carico non lineare, verrà quindi annullata dal compensatore attivo mediante iniezione di una corrente I_{act} uguale e contraria: in questo modo la corrente di impianto I_s risulta perfettamente sinusoidale.

La flessibilità e la precisione dei filtri attivi sono dovute a un sistema di controllo ad anello chiuso che include un ulteriore microprocessore oltre al DSP principale.

La programmazione può essere effettuata tramite, ad esempio, tramite una porta seriale RS232 utilizzando il computer e il software fornito insieme all'apparecchiatura.

Tale sistema di filtraggio viene utilizzato per impianti con utenze inquinanti di potenza totale più limitata.

Filtri Ibridi

Sono una via di mezzo dei due sistemi precedenti: il sistema di compensazione è costituito da una parte passiva, accordata sull'armonica più rilevante, e da una parte attiva che permette di adeguare la compensazione alle diverse situazioni di funzionamento dell'impianto.

La presenza della componente passiva permette un dimensionamento economicamente più leggero della parte attiva.

Questo sistema si utilizza in caso si voglia realizzare un sistema di compensazione molto preciso anche in presenza di carichi inquinanti con potenza installata rilevante.

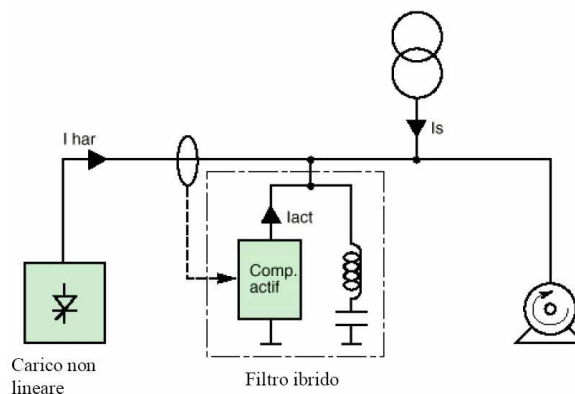


Figura 20 - Applicazione di filtri ibridi

6c) Criteri di scelta

I filtri passivi sono vantaggiosi quando, oltre alla necessità di una compensazione armonica, vi è quella di compensare l'energia reattiva dell'impianto.

Tale soluzione può però comportare dei problemi: supponiamo infatti che i carichi inquinanti non richiedano un'elevata potenza reattiva, mentre quelli lineari siano molto induttivi e rendano necessaria l'installazione di condensatori di rifasamento.

Per soddisfare le necessità di compensazione delle correnti armoniche e della potenza reattiva si può installare un filtro passivo; i filtri passivi permettono una compensazione molto precisa, tuttavia la potenza che sono in grado di fornire è limitata: nel caso di impianti con potenze rilevanti i costi diventano molto elevati.

I filtri ibridi riuniscono i vantaggi di entrambe le soluzioni.

7) Un esempio pratico: il problema del rifasamento

Viene di seguito riportato un caso relativo a un monitoraggio in un'utenza eseguito per una valutazione di risparmio energetico e ottimizzazione dei consumi.

Dall'analisi dei dati, è risultato che tale azienda prelevava energia reattiva oltre la franchigia gratuita, pagando così penalità in bolletta; pertanto uno degli interventi eseguiti è stato quello del rifasamento dell'impianto.

Il problema, apparentemente di non difficile soluzione, ha tuttavia reso indispensabile un approfondimento a causa della presenza di un elevato indice di armonicità emerso durante i prelievi.

Si è proceduto pertanto ad un'accurato studio del problema mediante analisi armonica dei prelievi e misura dell'impedenza equivalente della rete a monte: nelle figure seguenti sono riportati alcuni grafici, da cui si evince l'elevato valore di distorsione complessivo.

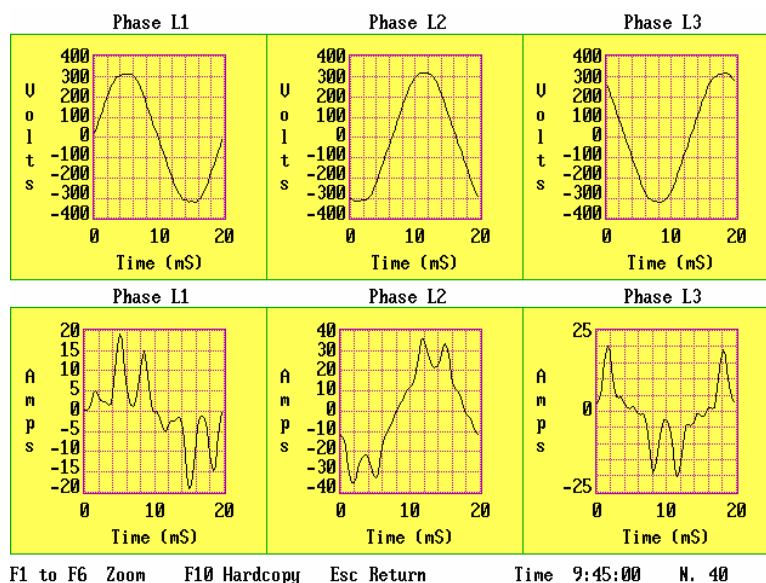


Figura 21 - Rilievo di forme d'onda di tensione e corrente nel dominio del tempo

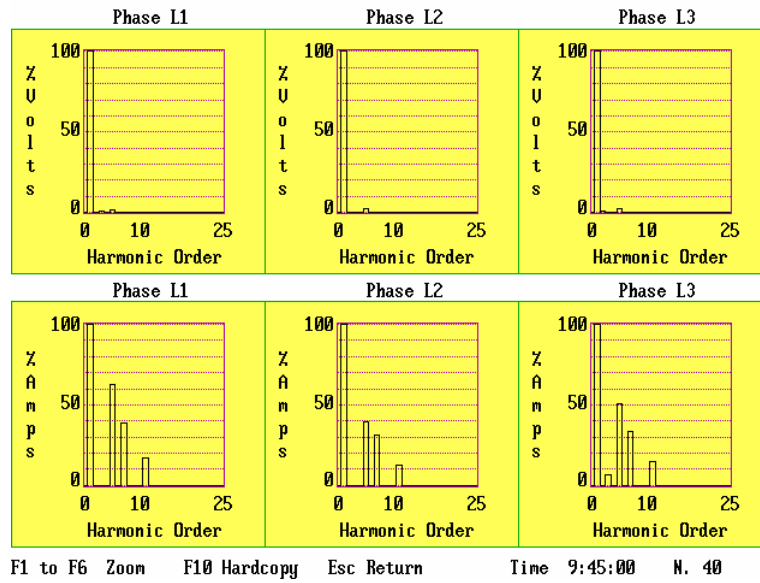


Figura 22 - Analisi spettrale nel dominio della frequenza relativa alla figura precedente

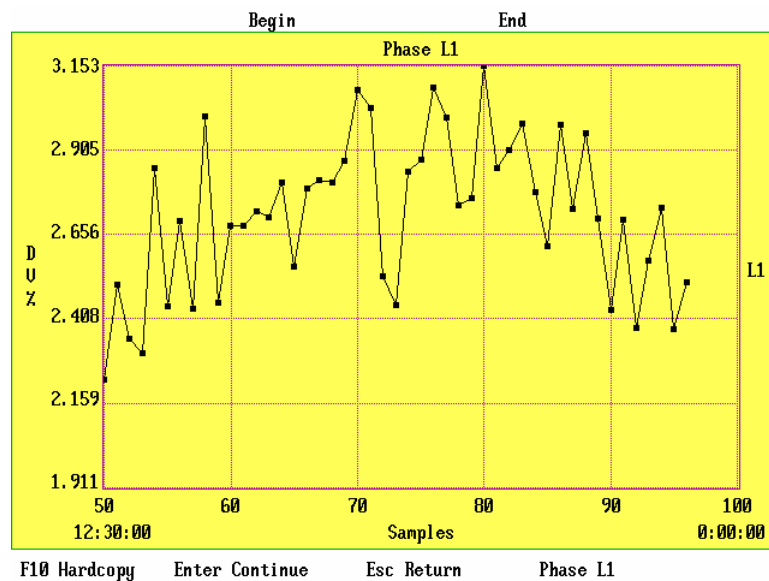


Figura 23 - Andamento della distorsione armonica di tensione

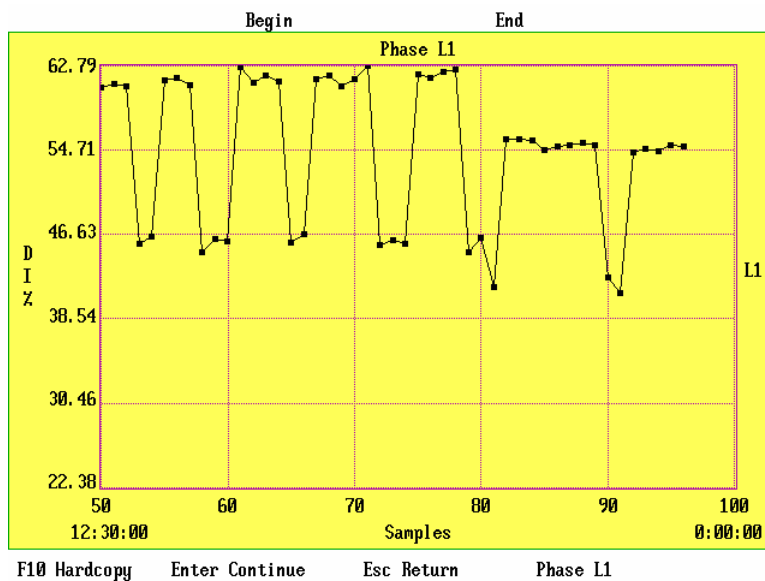


Figura 24 - Registrazione della distorsione armonica di corrente

Dai risultati ottenuti, una scelta progettuale che avesse previsto un rifasamento di tipo tradizionale si sarebbe rivelata fallimentare per i seguenti motivi:

- ↪ durata di vita assai ridotta dei condensatori;
- ↪ possibilità di risonanze con il resto dell'impianto;
- ↪ possibili esplosioni dei condensatori con rischio d'incendio (vedi foto).



Figura 25 - Ecco cosa può succedere ai condensatori...

(a sinistra un rifasatore automatico danneggiato, a destra un dettaglio di un condensatore esploso)

Riporto brevemente alcune considerazioni emerse dal rapporto di prova:

"...omissis..."

TENSIONE: esiste un moderato contenuto armonico, con distorsioni percentuali che normalmente si attestano su valori inferiori al 3%; le armoniche presenti sono solitamente la 5^a (250 Hz) e la 7^a (350 Hz).

CORRENTE: il valore della distorsione percentuale raggiunge in certi casi anche il 60% (periodi notturni e festivi), valore indubbiamente assai elevato; nelle ore lavorative, tale misura si attesta intorno al 30%.

*Sempre per quanto riguarda le armoniche di corrente, le più significative sono: nelle ore notturne la 3a (150 Hz), la 5a (250 Hz) e la 9a (450 Hz), durante la giornata lavorativa tali valori scendono in valore assoluto, ma compaiono anche armoniche di ordine superiore, apprezzabili addirittura fino alla 19a. (950 Hz).
omissis..."*

E' evidente che tali risultati hanno imposto attenzione e cautela nella scelta dell'apparecchiatura di rifasamento, rendendo di fatto insufficiente anche l'adozione di batterie con condensatori rinforzati.

Con riferimento ai dati relativi alle misure, è quindi stato necessario adottare dispositivi con induttanze di sbarramento idonei a sopportare distorsioni percentuali di corrente $DI\% > 50\%$ e distorsioni percentuali di tensione almeno pari al valore $DV\% = 3\%$ o superiori (es. 5%), onde evitare danneggiamenti dovuti a risonanze.

Si riportano altresì le principali caratteristiche del dispositivo scelto:

- ↪ *Teleruttori* - Ogni batteria è controllata da un contattore tripolare dimensionato in modo ottimale per offrire un'elevata affidabilità. La limitazione dei picchi di corrente determinati dall'inserzione delle batterie capacitive, è garantita dalle induttanze di blocco antirisonanti. Le bobine sono a 240Vac 50Hz;
- ↪ *Condensatori* - Si tratta di condensatori monofasi in polipropilene metallizzato, dotati di dispositivo antiscoppio e resistenza di scarica e la loro conformità alle norme è attestata dalle omologazioni IMQ. Sono impregnati in olio biodegradabile e sono tutti esenti da (PCB). Collegamento a TRIANGOLO. Tipo di servizio continuativo. Max. tensione permanente (senza carico armonico): 550Vac. • perdite per dissipazione: $\leq 0,4$ W/kvar • categoria temperatura: -25 / D (normativa CEI EN 60831-1);
- ↪ *Induttanze di sbarramento*, realizzate con nucleo in lamierino magnetico a cristalli orientati. • frequenza di accordo pari a 189Hz ($p=7\%$). • perdite per dissipazione: 100W per batterie 12,5kvar, 120W per batterie 25kvar - 185W per batterie 50kvar;
- ↪ max. distorsione armonica in tensione ammessa in rete $THD(v) = 3\%$.
- ↪ Tempi di inserzione / disinserzione batterie di condensatori: 25".



Figura 26 - Particolare del rifasatore: a destra sono ben visibili le induttanze di sbarramento

Concludendo, si rammenta la necessità - all'atto dell'installazione - di una corretta inserzione e impostazione del dispositivo di regolazione; è fondamentale in particolare;

1. inserire correttamente le apparecchiature e il dispositivo;
2. scegliere opportunamente il TA;
3. tarare correttamente il rapporto c/k .

Il punto 3 - spesso trascurato - è essenziale per il corretto funzionamento dell'apparecchiatura automatica; un'errata impostazione comporta i seguenti problemi:

- ↳ c/k troppo basso: si ha pendolamento dell'apparecchiatura automatica (continue inserzioni e disinserzioni delle batterie), causando un rapido deterioramento dei componenti;
- ↳ c/k troppo alto: l'apparecchiatura automatica risulterà insensibile alle variazioni di carico.

BIBLIOGRAFIA

- J.O.Bird - "Higher Electrical Technology" 1992 - Ed. Butterworth-Heinemann Ltd - Oxford.
Comar Condensatori - "Le Armoniche" 2000 - cataloghi e documentazione varia
Stefan Fassbinder - "Power Quality and Non-linear Loads" - DKI German Copper Institute
C.W.Lander - "Power Electronics" 1993 - Ed. McGraw Hill Book Company Europe.
Schneider Electric - "Harmonic disturbances in networks and their treatment"
Stefano Comuzzi - "Gli interventi sulla sicurezza ed i controlli sugli impianti elettrici" - Rassegna Tecnica FVG, 06-2000;
Monitoraggi, prove e misure elettriche dello Studio Tecnico Comuzzi - Udine