

Impianti di rifasamento:

da www.elektro.it , assemblaggio informatico a cura dell'ing Rizzi Enzo

1.1 Generalità

Gli apparecchi elettrici assorbono dalla rete di alimentazione una certa quantità di corrente che dipende dalle caratteristiche elettriche degli apparecchi stessi. Il prodotto di tale corrente per la tensione applicata si chiama potenza apparente (S) ed è in base a questa potenza che gli impianti elettrici devono essere dimensionati. La potenza che assorbe l'apparecchio e che è in grado di fornire all'esterno sotto forma di lavoro o di calore è normalmente minore della potenza apparente e si chiama potenza attiva (P). Il rapporto tra la potenza attiva e quella apparente è il fattore di potenza ($\cos \varphi$ variabile da 0 a 1), ossia lo sfasamento esistente tra la corrente e la tensione. Il $\cos \varphi$ è uguale ad uno quando la potenza apparente corrisponde alla potenza attiva, è minore di uno quando la potenza apparente è costituita in parte da potenza reattiva e in parte da potenza attiva. La maggior parte degli utilizzatori presenta un basso fattore di potenza e richiede dalla linea più potenza apparente e quindi più corrente di quanta ne richiederebbe con un $\cos \varphi$ maggiore. Per questo motivo le normative vigenti e considerazioni di ordine tecnico impongono di utilizzare l'energia elettrica con un fattore di potenza non inferiore a 0,9. Una situazione di questo tipo si può ottenere inserendo nell'impianto delle batterie di condensatori e operando il cosiddetto rifasamento. Due sono i vantaggi che fondamentalmente possono derivare dal rifasamento: mancata penale che l'ente distributore solitamente pratica a chi utilizza energia elettrica con un fattore di potenza medio mensile inferiore a 0,9 e migliore utilizzazione degli impianti. Sui vantaggi del primo tipo è superfluo fare qualsiasi commento mentre fra i vantaggi del secondo tipo possiamo metterne in evidenza alcuni tra i più importanti: minore immobilizzo di capitali (trasformatori di potenza minore, conduttori di sezione più piccola ecc..), minori perdite e minor consumo di energia. Il fattore di potenza può essere migliorato anche utilizzando le macchine in modo razionale ed in particolare usando motori e trasformatori correttamente dimensionati (possibilmente non devono funzionare a carico ridotto per tempi troppo lunghi), non utilizzando motori e trasformatori senza carico ed evitando di mantenere in funzione motori difettosi.

1.2 Aspetti teorici

In un circuito funzionante in corrente alternata la corrente assorbita da un utilizzatore, esclusi i carichi puramente resistivi, è rappresentata da due componenti distinte: una corrente attiva I_a e una corrente reattiva I_L . La corrente attiva è destinata al lavoro utile prodotto dall'utilizzatore ed è in fase con la tensione applicata al circuito, mentre la corrente reattiva, destinata alla creazione dei campi magnetici indispensabili al funzionamento di molti utilizzatori elettrici, è in ritardo di 90° rispetto alla tensione applicata al circuito. La corrente risultante che ne deriva vale:

$$I = \sqrt{I_a^2 + I_L^2}$$

dove:

$$I_a = I \cos \varphi$$

$$I_L = I \sin \varphi$$

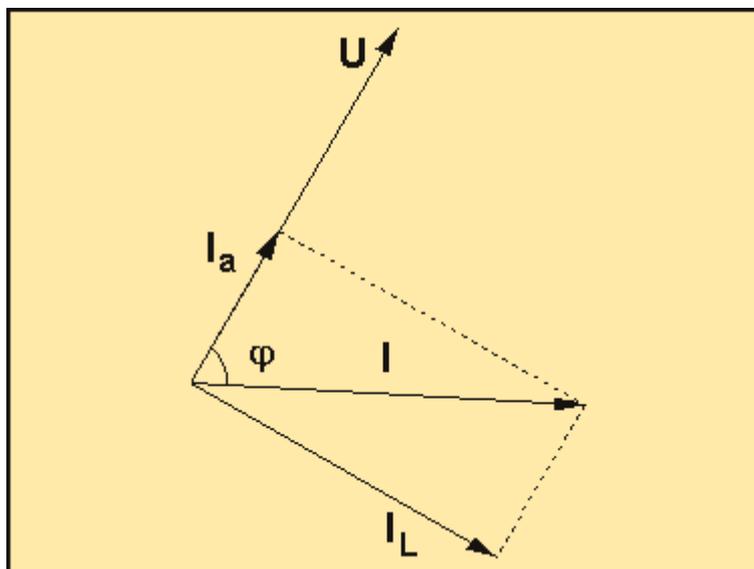


Fig. 1.2.1 - Diagramma vettoriale della corrente in un circuito induttivo

Da cui:

per i circuiti monofasi (U=tensione applicata):

$$P = UI \cos \varphi \quad \text{Potenza attiva}$$

$$Q = UI \sin \varphi \quad \text{Potenza reattiva}$$

$$A = UI \quad \text{Potenza apparente}$$

per i circuiti trifasi (U = tensione concatenata):

$$P = \sqrt{3}UI \cos \varphi \quad \text{Potenza attiva}$$

$$Q = \sqrt{3}UI \sin \varphi \quad \text{Potenza reattiva}$$

$$A = \sqrt{3}UI \quad \text{Potenza apparente}$$

Tali relazioni sono rappresentabili mediante il cosiddetto triangolo delle potenze da cui è possibile ricavare le seguenti espressioni :

$$\cos \varphi = \frac{P}{A} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}}$$

$$\frac{Q}{P} = \operatorname{tg} \varphi \quad ; \quad Q = P \operatorname{tg} \varphi$$

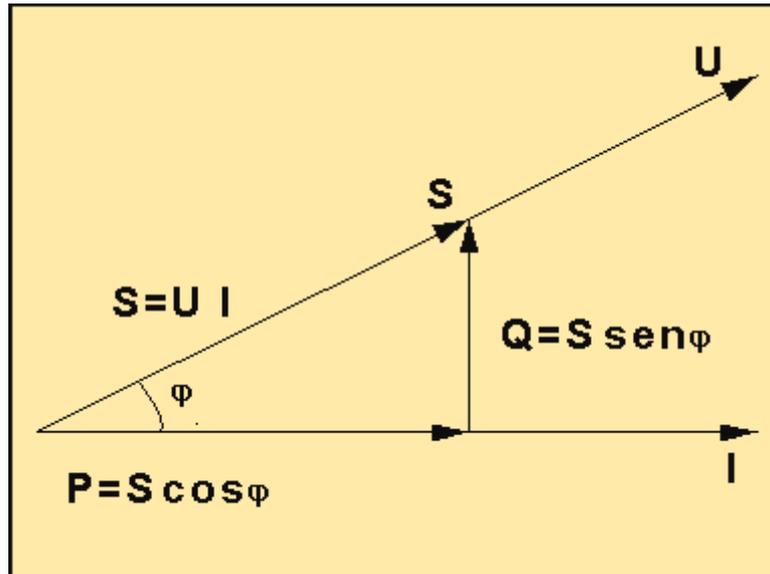


Fig. 1.2.2 - Triangolo delle potenze

Risulta evidente che, per fornire una potenza P ad una determinata tensione U, occorre una corrente pari a:

$$I = \frac{P}{\sqrt{3}U \cos \varphi}$$

in trifase

$$I = \frac{P}{U \cos \varphi}$$

in monofase

La corrente è inversamente proporzionale al $\cos \varphi$ e quindi per ridurre tale corrente al valore più basso possibile dovrebbe essere $\cos \varphi = 1$ e in questo caso si avrebbe:

$$I = I_2 = \frac{P}{\sqrt{3}U}$$

in trifase

$$I = I_a = \frac{P}{U} \quad \text{in monofase}$$

1.2.1 Problemi derivanti da un basso cosfi

Il dimensionamento di un impianto elettrico è realizzato in funzione della potenza apparente complessiva tenuto conto dei coefficienti di contemporaneità dei carichi. Il valore della corrente per cui si dimensiona l'impianto corrisponde alla somma vettoriale della corrente attiva I_a e della corrente reattiva I_L . Tale valore, restando costante il valore della corrente attiva necessaria, risulta tanto maggiore quanto maggiore è la corrente reattiva richiesta dai carichi e impone un sovradimensionamento della sezione dei cavi. Si ha infatti un incremento delle perdite per effetto joule ($P_j=RI^2$) e delle cadute di tensione. Dall'espressione della caduta di tensione $\Delta U = \sqrt{3}I(R \cos \varphi + X \sin \varphi)$ sostituendo si ottiene:

$$I = \frac{P}{\sqrt{3}U \cos \varphi}$$

e semplificando è possibile ricavare:

$$\Delta U = \frac{P}{U \cos \varphi} (R \cos \varphi + X \sin \varphi) = \frac{PR \cos \varphi + PX \sin \varphi}{U \cos \varphi}$$

da cui:

$$\frac{\Delta U}{U} = \frac{RP + XQ}{U^2}$$

che evidenzia come a maggiori valori di Q corrispondono maggiori valori di ΔU . Tutto questo si traduce in pratica in un aumento dei costi a causa delle maggiori perdite o per la necessità di dover sovradimensionare l'impianto di

distribuzione al fine di contenere le cadute di tensione al di sotto dei limiti imposti. A questo va ovviamente aggiunto l'eventuale sovrapprezzo imposto dall'ente distributore.

1.2.2 Formule di calcolo e scelta dei condensatori

Oltre ai carichi induttivi di cui sopra esiste un'altra categoria di carichi cosiddetti capacitivi (condensatori e compensatori sincroni). Anche questi carichi assorbono energia reattiva ma, in questo caso, la corrente assorbita risulta sfasata in anticipo rispetto alla tensione.

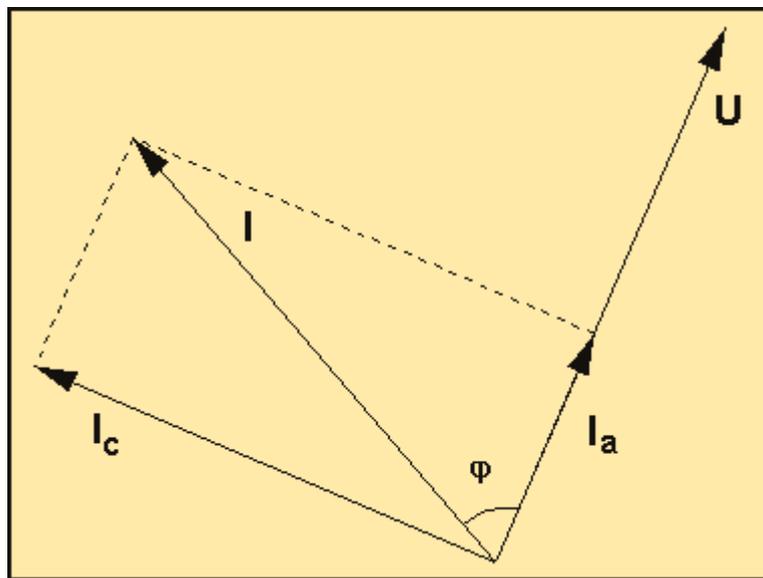


Fig. 1.2.3 - Diagramma vettoriale della corrente in un circuito capacitivo

Per questi carichi l'espressione della potenza reattiva capacitiva è simile a quella relativa alla potenza reattiva induttiva con la differenza che, poiché la corrente ha segno opposto, la potenza è negativa. L'inserimento di un condensatore determina la riduzione della componente reattiva della corrente e la conseguente diminuzione della corrente complessiva assorbita dal circuito. A tutto questo fa seguito una diminuzione complessiva della potenza reattiva necessaria e un miglioramento del fattore di potenza.

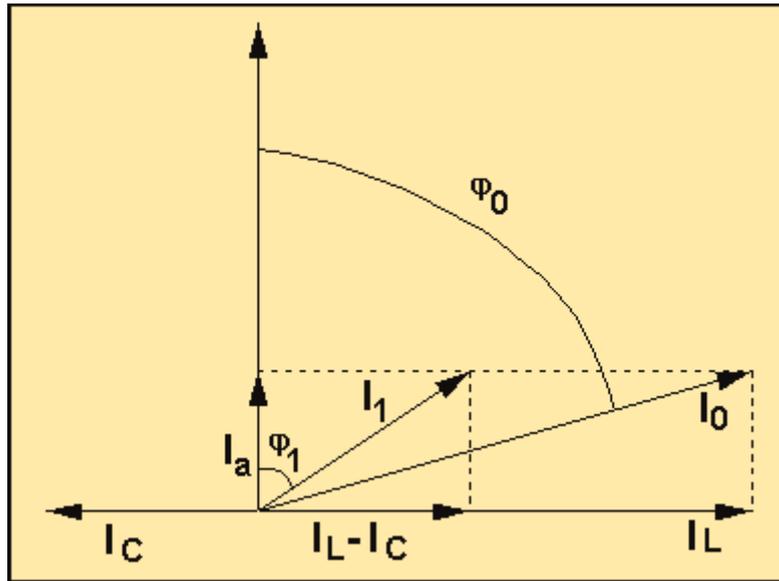


Fig. 1.2.4 - Diagramma vettoriale delle correnti in un circuito induttivo - capacitivo

E' possibile sfruttare il fenomeno appena descritto introducendo di proposito nell'impianto dei carichi capacitivi operando quell'operazione che prende appunto il nome di rifasamento. Si pone a questo punto il problema di calcolare la potenza reattiva capacitiva necessaria per riportare il fattore di potenza a valori accettabili. Indicando con:

P la potenza attiva dell'impianto da rifasare ;

φ_0 l'angolo di sfasamento iniziale ;

φ_1 l'angolo di sfasamento a cui si vuole portare l'impianto dopo il rifasamento

Principali tipi costruttivi di condensatori

I condensatori che oggi vengono comunemente impiegati sono del tipo a film sintetico metallizzato. Una pellicola di polipropilene viene ricoperta, per mezzo di un processo di vaporizzazione, da un sottilissimo strato metallico di alluminio o di zinco (fig. 1.2.5).

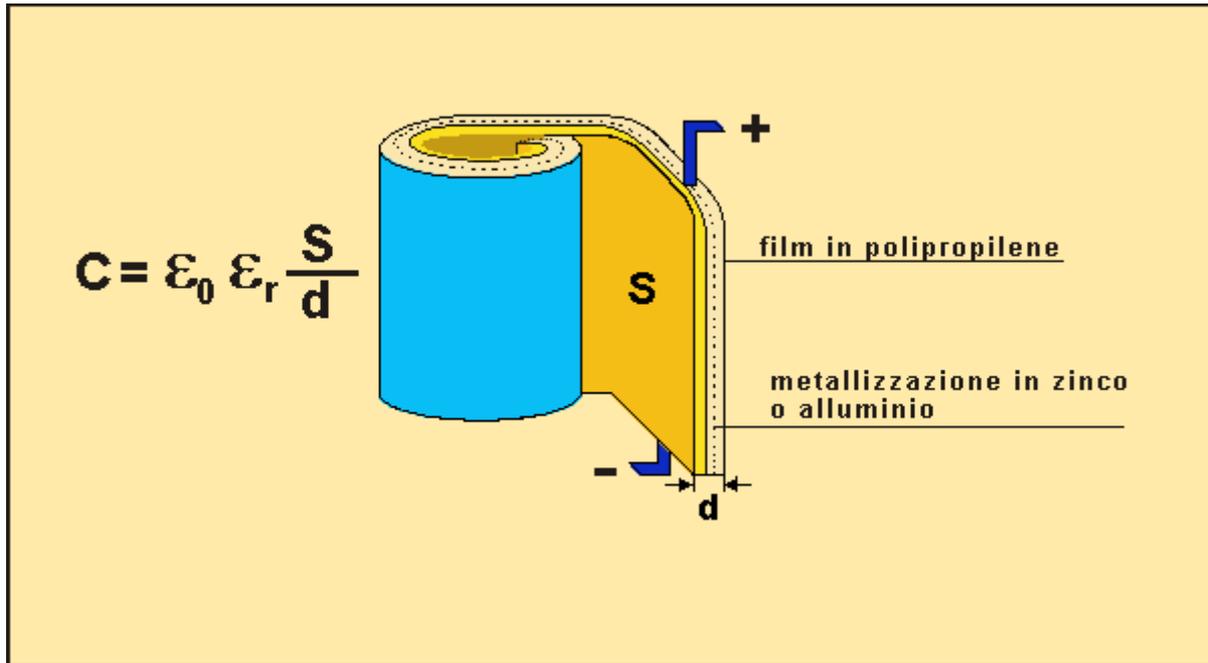


Fig. 1.2.5 - Esempio costruttivo di condensatore

Avvolgendo due film metallizzati uno di fianco l'altro si ottiene un cilindro molto compatto che viene essiccato e impregnato per impedire al dielettrico di imprigionare bolle d'aria che potrebbero costituire un punto debole soggetto a scarica. Dai cilindri vengono fatte sporgere due alette metalliche collegate ai terminali (condensatore ad un elemento) che possono essere collegate in serie o in parallelo con altri elementi a formare una batteria di condensatori. I film possono essere di tipo ordinario oppure autorigenerabili che reintegrano per effetto del calore la parte danneggiata da una scarica. Il tipo autorigenerabile consente, a parità di prestazioni, minori dimensioni. Esistono condensatori a bassa tensione (230/400V) e a media tensione che vengono impiegati solitamente per rifasare i trasformatori di cabina. I tipi a bassa tensione esistono di diversa taglia di potenza, da qualche watt, per il rifasamento delle lampade, a potenze più elevate (qualche centinaio di kW) per il rifasamento dei trasformatori in cabina MT/BT. I condensatori possono essere collegati in serie per aumentare la tensione nominale della batteria oppure in parallelo per aumentare la capacità complessiva e di conseguenza la potenza reattiva.

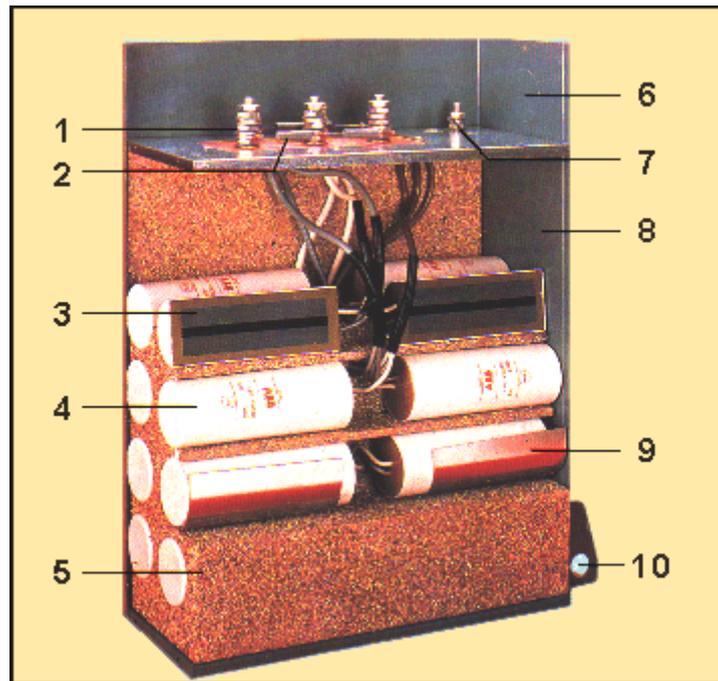


Fig. 1.2.6 - Struttura di una batteria di condensatori

1 - Morsetti di connessione elettrica

2 - Resistenza di scarica

3- Bobine a pellicola metallizzata autorigeneranti

4 - Contenitore per bobine in materiale plastico

5 - Materiale inerte atossico per l'assorbimento dell'energia nei fenomeni di guasto

6 - Foro ingresso cavi

7 - Morsetto di terra

8 - Contenitore in pvc o metallo

9 - Dissipatore termico in alluminio

10 -Squadretta di fissaggio al basamento

Scelta della potenza di una batteria di condensatori

La potenza reattiva capacitiva necessaria per ridurre la potenza reattiva dal valore Q_0 al valore Q_1 vale :

$$Q_c = Q_0 - Q_1$$

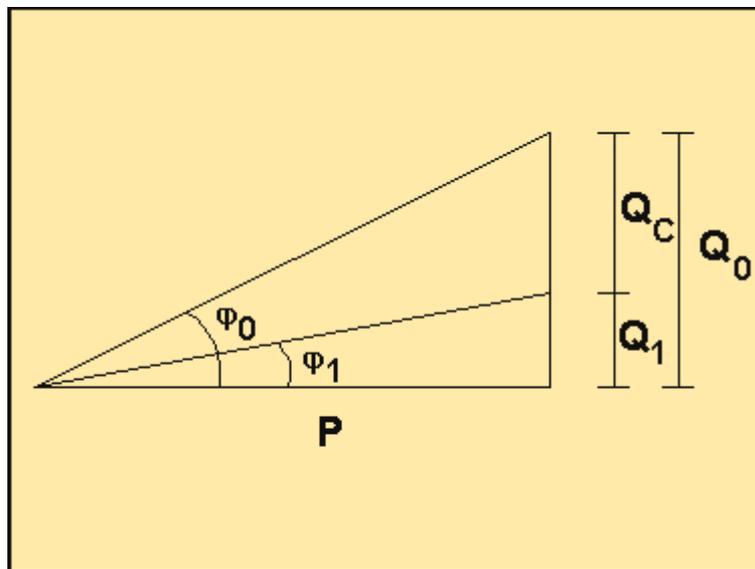


Fig. 1.2.7 - Diagramma delle potenze in un circuito induttivo - capacitivo

Essendo la potenza reattiva assorbita in assenza di rifasamento

$$Q_0 = P \operatorname{tg} \varphi_0$$

e la potenza reattiva a rifasamento inserito

$$Q_1 = P \operatorname{tg} \varphi_1$$

la potenza reattiva capacitiva dovrà essere:

$$Q_c = P(\operatorname{tg} \varphi_0 - \operatorname{tg} \varphi_1)$$

Tale relazione permette in generale, nota la potenza attiva richiesta dai carichi ed il relativo fattore di potenza, di ottenere direttamente il valore della potenza capacitiva della batteria di condensatori, per ottenere un determinato fattore di potenza $\cos \varphi_1$. In pratica l'applicazione delle succitate formule non è sempre agevole in quanto può a volte essere difficile stabilire il valore della potenza attiva P e del $\cos \varphi_0$ se questi sono variabili nel tempo. Sarebbe necessario conoscere il diagramma di carico dell'impianto da rifasare, ovvero le curve della potenza o dell'energia attiva e reattiva in funzione del tempo. Nella tabella 1.4.2 sono raccolti i coefficienti "C"= $(\operatorname{tg} \varphi_0 - \operatorname{tg} \varphi_1)$ per cui moltiplicare la potenza media di un impianto per avere i kvar necessari ad elevare il fattore di potenza ai valori richiesti. Alcuni esempi successivi aiuteranno a chiarire l'argomento.

Tensione nominale delle batterie e potenza reattiva erogata

A seconda della tensione di alimentazione una batteria di condensatori, a parità di capacità, eroga un diverso valore di energia reattiva. In corrispondenza di un determinato valore di tensione nominale U_{nc} , la batteria di condensatori eroga una potenza nominale Q_{nc} . Quando la tensione di alimentazione U_n è inferiore a quella nominale l'erogazione è inferiore secondo la relazione:

$$Q = Q_{nc} \left(\frac{U_n}{U_{nc}} \right)^2$$

Per ottenere una potenza rifasante Q_c ad una particolare tensione U_n è perciò necessario prevedere una batteria avente potenza nominale:

$$Q_{nc} = Q_c \left(\frac{U_{nc}}{U_n} \right)^2$$

U_{nc} = tensione nominale della batteria di condensatori

U_n = tensione nominale di alimentazione

1.2.3 Scelta del condensatore

La scelta del condensatore è funzione del tipo di sistema (monofase o trifase) e del tipo di collegamento (stella o triangolo). Dai dati di targa, le grandezze caratteristiche del condensatore possono essere ricavate dalle seguenti formule:

- per unità monofase, la capacità C della batteria di condensatori è:

$$C = \frac{Q_n}{2\pi f U_n^2}$$

e la corrente nominale:

$$I_n = 2\pi f C U_n$$

- per ciascuno dei tre condensatori di una unità trifase, si ha invece :

$$C_{(Y)} = \frac{Q_n}{2\pi f U_n^2} ;$$

con un collegamento a stella ,

$$I_{nC} = I_L = \frac{2\pi f (C_{(Y)} U_n)}{\sqrt{3}}$$

con un collegamento a triangolo,

$$C_{(\Delta)} = \frac{Q_n}{2\pi f U_n^2 \times 3}; \quad I_{nC} = 2\pi f C_{(\Delta)} U_n;$$

$$I_L = \sqrt{3} \times 2\pi f C_{(\Delta)} U_n$$

Dove :

U_n = tensione concatenata del sistema di alimentazione,

I_L = corrente di linea,

I_{nC} = corrente che attraversa il condensatore.

Da quanto sopra esposto si deduce che, a parità di potenza reattiva, la connessione a stella richiede capacità 3 volte maggiori e i condensatori sono sottoposti ad una tensione $\sqrt{3}$ minore. A parità di capacità invece se il collegamento è a stella la potenza reattiva fornita è tre volte minore (la corrente e la tensione sul condensatore sono $\sqrt{3}$ minori) che nel caso del collegamento a triangolo.

1.2.4 Metodi di rifasamento

Prima di passare al dimensionamento della batteria di condensatori è necessario sceglierne l'ubicazione nell'impianto. In base a tale scelta è possibile individuare i diversi metodi di rifasamento.

Rifasamento distribuito

Consiste nel rifasare localmente ciascun carico installando una batteria di condensatori dedicata (è il metodo utilizzato dai costruttori per rifasare le lampade fluorescenti). Questa è la soluzione migliore in quanto permette non solo di ridurre la potenza reattiva richiesta alla rete di alimentazione ma anche di migliorare lo sfruttamento dell'impianto, riducendone le correnti e conseguentemente anche le perdite e le cadute di tensione. E' una soluzione piuttosto costosa e risulta solitamente conveniente solo per

grossi carichi concentrati. Si preferisce quindi effettuare un rifasamento distribuito per gruppi o per settori dell'impianto.

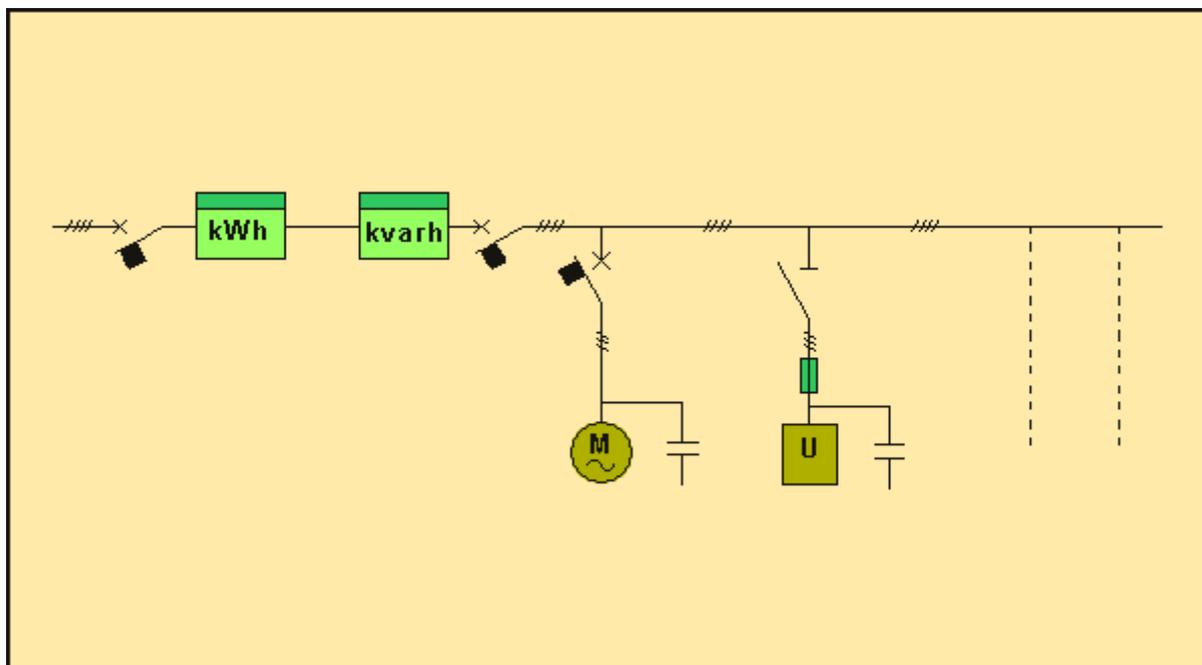


Fig. 1.2.8 - Rifasamento distribuito

Rifasamento per gruppi

Quando è possibile suddividere l'impianto in gruppi di utilizzatori con caratteristiche di funzionamento omogenee può risultare conveniente rifasare un gruppo di utilizzatori con un'unica batteria di condensatori. In questo caso è bene ricordare che non c'è miglior sfruttamento dei cavi per tutta la rete a valle del punto di collegamento del condensatore.

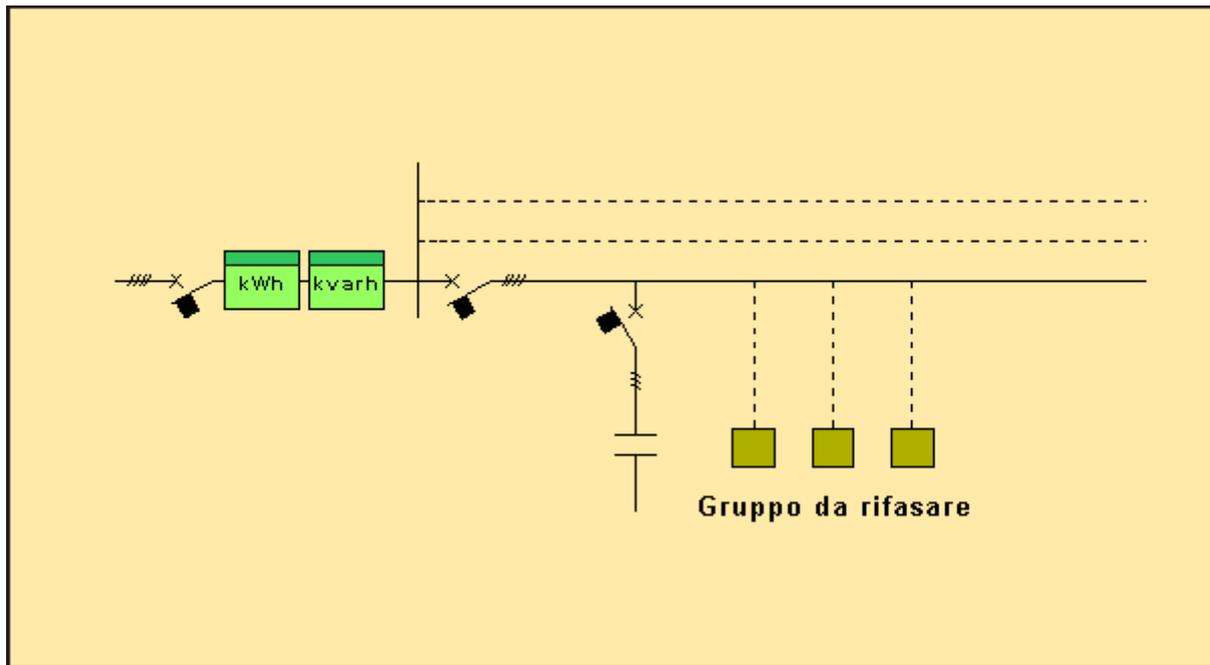


Fig. 1.2.9 - Rifasamento per gruppi

Rifasamento centralizzato

E' il metodo in assoluto più economico e consiste nell'installare un'unica batteria di condensatori a monte di tutto l'impianto. Può essere considerato l'opposto del rifasamento distribuito in quanto non determina uno sfruttamento ottimale dell'impianto. E' senz'altro il sistema migliore se installato in impianti in cui si ha un assorbimento pressoché costante di potenza reattiva.

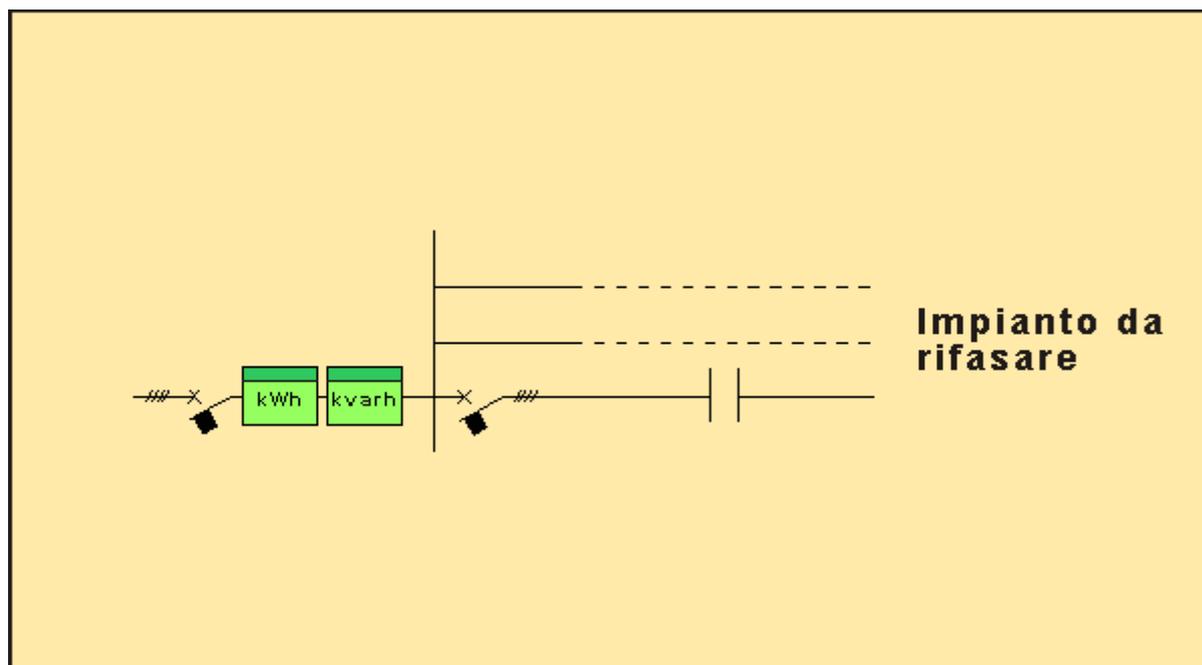


Fig. 1.2.8 - Rifasamento centralizzato

Rifasamento centralizzato con batterie ad inserzione/disinserzione automatica

Negli impianti in cui invece le condizioni di carico sono piuttosto variabili (si ricorda il divieto di abbassare il fattore di potenza al di sotto del valore 0,7 e la convenienza di mantenerlo al di sopra di 0,9, con potenze impegnate superiori a 15 kW, per evitare sovrapprezzi. Anche il divieto per l'utente di erogare energia reattiva verso la rete di fornitura è un ulteriore motivo che impone di controllare e regolare il rifasamento in funzione del carico che presenta durante il normale esercizio) vengono impiegati sistemi di rifasamento automatici che, per mezzo di un sistema di rilevamento di tipo varmetro, permettono l'inserzione o la disinserzione automatica di diverse batterie di condensatori, seguendo in tal modo le variazioni della potenza reattiva assorbita e mantenendo costante il fattore di potenza dell'impianto. Nello schema logico che segue è rappresentato il principio operativo dei quadri di rifasamento automatico: Un opportuno dispositivo (relè di regolazione) confronta il valore desiderato del fattore di potenza a quelli effettivamente assunti dall'impianto durante l'esercizio. In base allo scostamento rilevato comanda l'inserimento o il disinserimento, attraverso opportuni contattori, dei gruppi di condensatori (corrispondenti ai prefissati gradini di regolazione) necessari per mantenere il fattore di potenza al valore prefissato. Il prelievo dei segnali, a monte del punto di installazione della batteria di condensatori, viene effettuato per il segnale amperometrico tramite un trasformatore di corrente (TA) posto su una delle tre fasi e

mediante collegamento diretto, o mediante trasformatore di tensione (TV) sulle altre due fasi per il segnale voltmetrico.

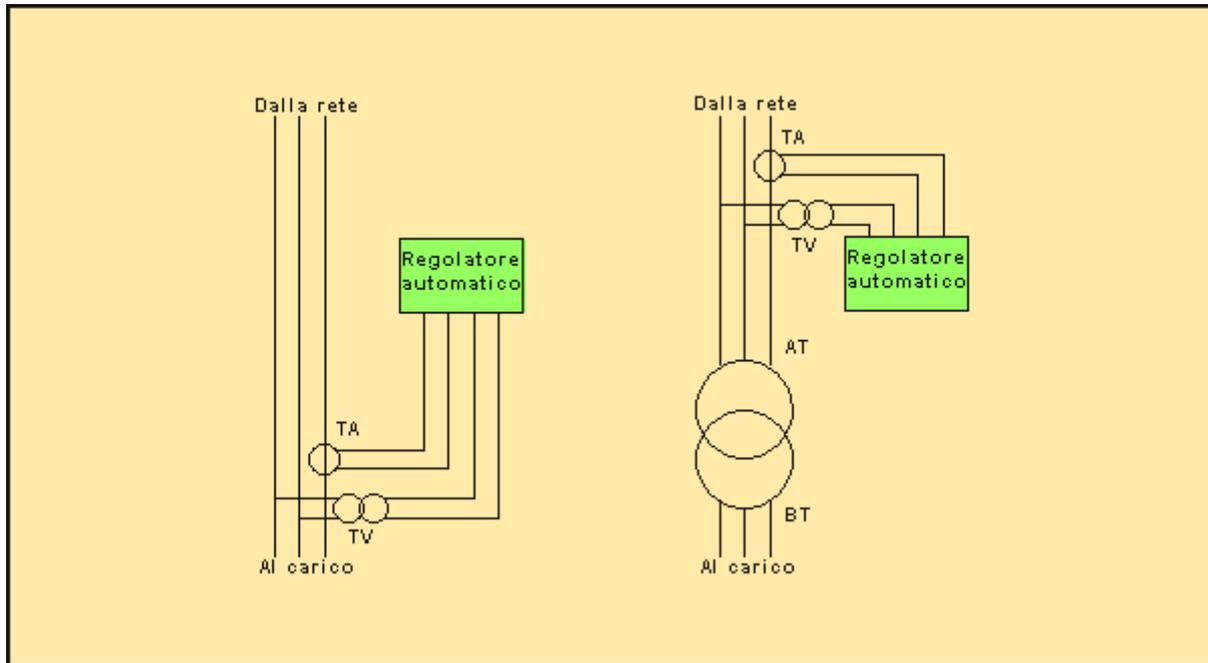


Fig. 1.2.9 - Schema di inserzione di un regolatore automatico

Per consentire un funzionamento senza pendolamenti (inserzione e disinserione continua anche in presenza di piccoli carichi con basso fattore di potenza che potrebbero creare una situazione di instabilità con oscillazioni attorno a valori limite del fattore di potenza e provocare la rapida usura dei contatti e danni ai condensatori) nei regolatori più sofisticati vengono presi opportuni accorgimenti come tempi di risposta ritardati e intervalli di non intervento in funzione del valore della corrente nominale. Al fine di fornire una potenza che sia la più vicina possibile a quella richiesta, l'inserzione dei condensatori avviene a gradini con una precisione di controllo che sarà tanto maggiore quanto numerosi saranno i gradini e quanto più piccola sarà la differenza tra l'uno e l'altro. La potenza complessiva viene frazionata in un certo numero di batterie uguali oppure con potenza che segue la proporzione $1,2,4,8,\dots,2^n-1$. Nel primo caso il numero delle combinazioni è uguale al numero di batterie di condensatori mentre nel secondo caso il numero delle combinazioni è molto elevato (2^n-1 , essendo n il numero delle batterie di condensatori) permettendo una regolazione dell'energia reattiva più precisa. Se da un lato la regolazione risulta più precisa con questo secondo tipo di batterie è bene però ricordare che in questo caso esiste il problema, in fase di inserzione, della scarica di una batteria sull'altra essendo tanto più problematico quanto più le batterie sono di potenza diversa.

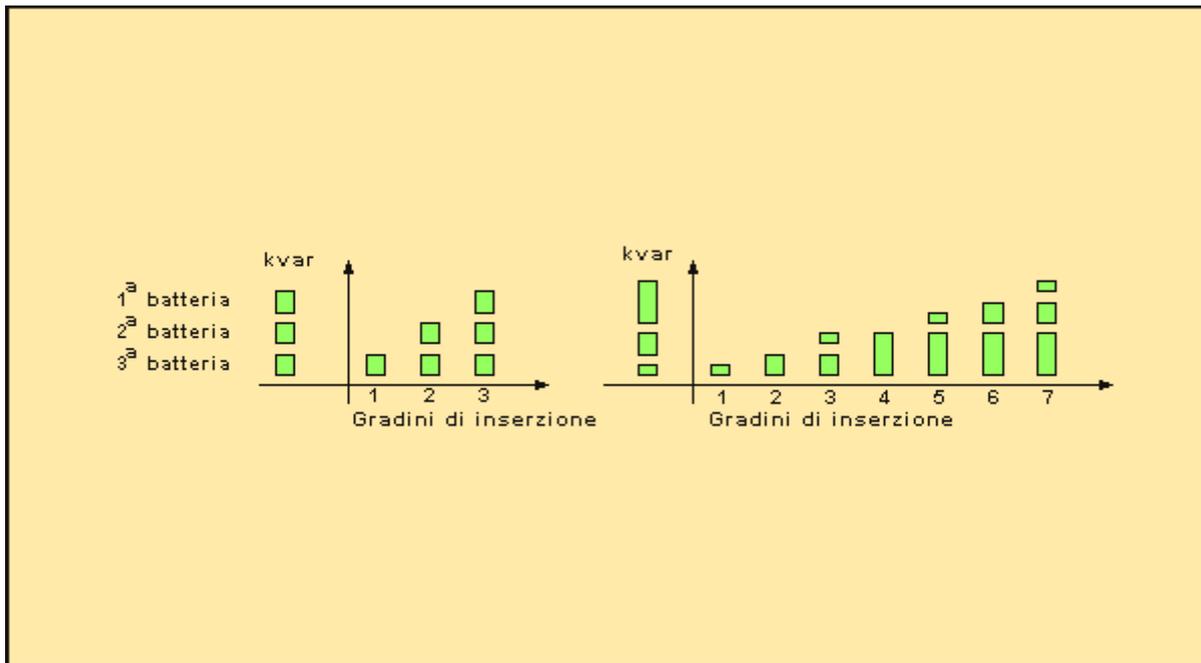


Fig. 1.2.10 - Frazionamento delle batterie di condensatori

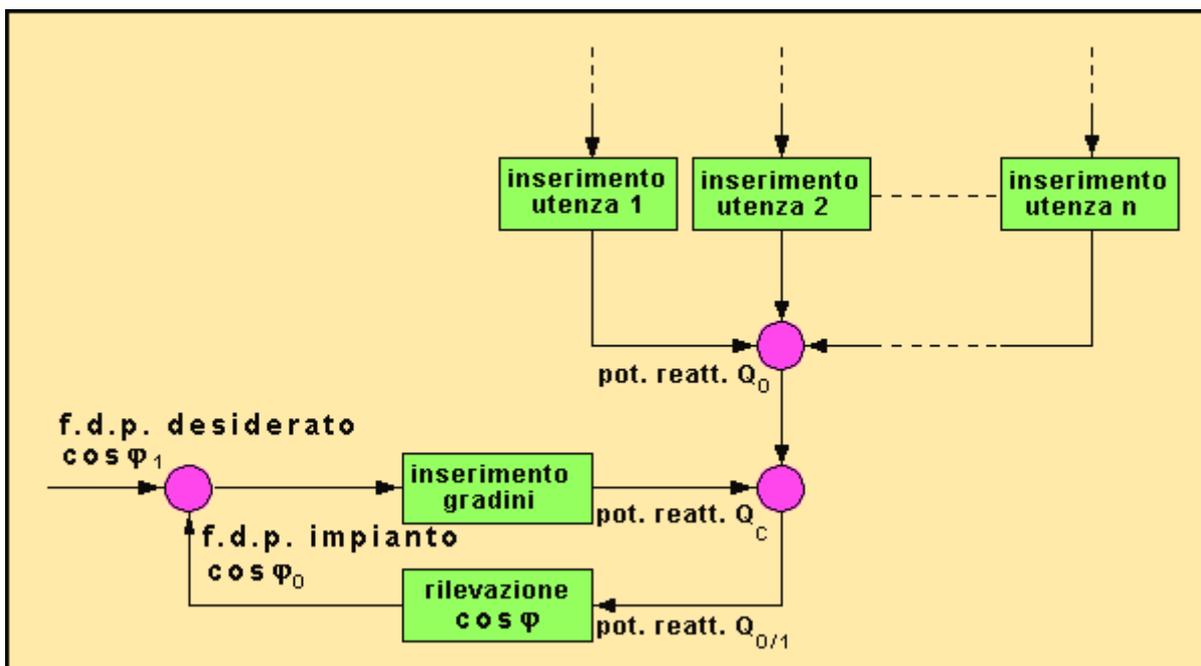


Fig. 1.2.11 - Schema logico di funzionamento dei quadri di rifasamento automatici

Rifasamento misto

In pratica si ricorre spesso a un sistema di rifasamento di tipo misto cioè utilizzando tutti o in parte i sistemi visti in precedenza.

1.3 Calcolo pratico della potenza di rifasamento

Per determinare la potenza capacitiva (kvar) necessaria per elevare il fattore di potenza al valore voluto, normalmente 0,9, occorre prendere in considerazione alcune fatture dell'Ente distributore (almeno 3 con esclusione di quelle meno significative come ad esempio quelle dei mesi di agosto e dicembre). Dalla colonna relativa al consumo di energia attiva si rilevano i valori corrispondenti ai consumi dei mesi presi in considerazione ; il valore che si legge in tale colonna rappresenta l'energia attiva in kWh . Facendone la somma e dividendo il totale per il numero di ore effettivamente lavorate nel corso dei mesi considerati è possibile ricavare la potenza media consumata in questo periodo. Occorre ora calcolare il fattore di potenza medio relativo ai suddetti mesi. Si deve procedere nel seguente modo:

sommare tutti consumi di energia attiva in kWh ;

sommare tutti i consumi dell'energia reattiva ;

fare il rapporto della somma dell'energia reattiva totale e della somma dell'energia attiva totale.

Il rapporto così ottenuto è la $\tan \varphi$ media mensile dalla quale, mediante apposite tabelle, è facile ricavare il $\cos \varphi$ medio mensile. Qualora nelle fatture dell'ente distributore compaia anche il fattore di potenza mensile si può calcolare il fattore di potenza medio relativo ai mesi considerati facendone la media aritmetica. Questo metodo, pur non corretto dal punto di vista teorico, fornisce comunque un risultato abbastanza prossimo a quello reale. Un altro metodo, per la verità piuttosto laborioso, consiste nel determinare il fattore di potenza direttamente dalla lettura dei contatori della potenza attiva e reattiva. E' necessario disporre di un orologio col quale misurare un determinato intervallo di tempo. Due persone dovranno, in tale intervallo di tempo, contare l'una, il numero dei giri effettuati dal contatore della potenza attiva, l'altra il numero dei giri effettuati dal contatore dell'energia reattiva. Dopo aver rilevato la costante degli strumenti (tali costanti indicano a quanti giri corrisponde un kWh e un kvarh rispettivamente) occorre dividere il numero dei giri effettuati dai due

contatori per le rispettive costanti. I valori così calcolati possono essere utilizzati per calcolare la $\tan \varphi$ (l'energia reattiva diviso l'energia attiva) e successivamente, come abbiamo visto, il $\cos \varphi$. Il fattore di potenza così calcolato è relativo all'intervallo di tempo preso in considerazione.

1.4 Come rifasare - Suddivisone della potenza capacitiva

A questo punto la potenza reattiva capacitiva calcolata deve, per poter essere correttamente utilizzata, essere opportunamente suddivisa. Per meglio comprendere il problema verranno di seguito sviluppati alcuni problemi di carattere pratico.

1.4.1 Rifasamento dei motori asincroni

Per rifasare un motore asincrono trifase occorre innanzitutto conoscere le caratteristiche elettriche del motore stesso. Dai dati di targa è possibile rilevare alcuni parametri elettrici caratteristici quali la potenza, la tensione nominale, la frequenza, la corrente di avviamento e il numero dei poli che verranno utilizzati per il calcolo della potenza reattiva che ci permetterà di scegliere il condensatore di rifasamento. Il condensatore deve essere collegato alla rete al momento della partenza del motore e disinserito successivamente al momento del suo arresto. Per lo scopo si potrebbe utilizzare un contatto libero del teleruttore di avviamento del motore oppure collegare il condensatore a valle dell'interruttore. In questo caso occorre assicurarsi che il motore non giri troppo a lungo per inerzia dopo l'interruzione dell'alimentazione, perché in tal caso esso, comportandosi come generatore, caricherebbe il condensatore ad esso collegato provocando pericolosi aumenti di tensione.

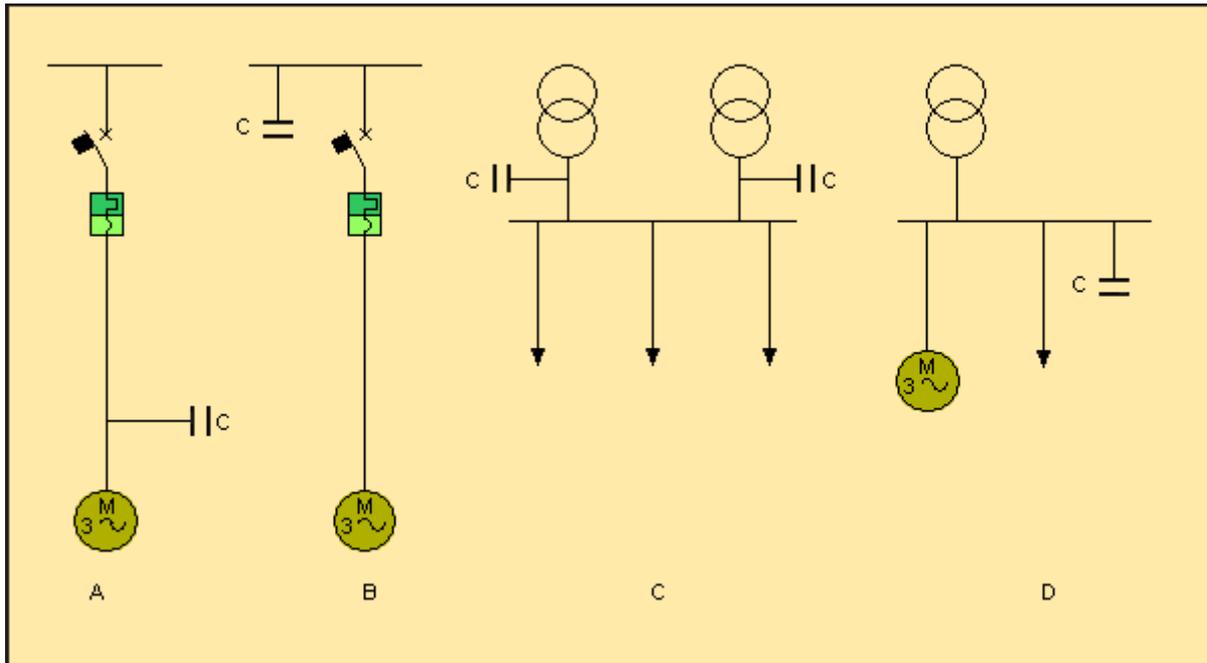


Fig. 1.4.1 - Esempi di schemi d'installazione dei condensatori di rifasamento

Esempio 1

Si deve rifasare un motore asincrono trifase che presenta le seguenti caratteristiche:

$P=100 \text{ kW}$ $f=50\text{Hz}$ $V=400\text{V}$ $I_0=50\text{A}$

Il condensatore sarà direttamente allacciato ai morsetti del motore come rappresentato nella figura (fig 1.4.1.A).

Si vuole evitare che il fattore di potenza risulti in anticipo e quindi si impone che la corrente di rifasamento non sia superiore al 90% della corrente a vuoto I_0 del motore.

$$I = I_0 \times 90\%$$

$$I = 50 \times 90\% = 45\text{A}$$

La potenza reattiva generata dal condensatore dovrà essere:

$$Q = 1,73 \times V \times I$$

$$Q = 1,73 \times 400 \times 45 = 31,1 \text{ k var}$$

Nell'intorno del valore 31,1 kvar è possibile scegliere il condensatore, ad esempio un condensatore di potenza pari a 30 kvar.

Esempio 2

Un motore asincrono presenta le seguenti caratteristiche (fig 1.4.1 A)

P=300kW

V=550V

f=50Hz

Il condensatore di rifasamento dovrà essere allacciato direttamente ai morsetti del motore. Non essendo conosciuto il valore della corrente a vuoto può essere considerato con buona approssimazione uguale al 30% della corrente nominale del motore per cui:

$$I_n = \frac{P}{1,73 \times V \times \cos \varphi} = \frac{300}{1,73 \times 500 \times 0,8} = 542 \text{ A}$$

$$I_0 = I_n \times 30\% = 542 \times 30\% = 162 \text{ A}$$

$$I = I_0 \times 90\% = 162 \times 90\% = 146 \text{ A}$$

$$Q = 1,73 \times V \times I = 1,73 \times 550 \times 146 = 138,9 \text{ k var}$$

Si potrebbe impiegare un condensatore da 140kvar alla tensione di 550V

Esempio 3

Rifasare un motore asincrono trifase con un condensatore, direttamente allacciato alla sua linea di alimentazione, avente le seguenti caratteristiche (fig 1.4.1 B):

$P=130 \text{ kW}$, $V=400\text{V}$, $f=50\text{Hz}$, $n=1470 \text{ giri/m}$

Da apposite tabelle ricavate da rilievi sperimentali è possibile individuare la potenza reattiva. Facendo riferimento alla tabella che segue è possibile verificare che:

$$Q \cong 34 \text{ kvar}$$

Potenza nominal e		Velocità di rotazione (giri/min)			
kW	cv	3000	1500	1000	750
22	30	6	8	9	10
30	40	7,5	10	11	12,5
37	50	9	11	12,5	16
45	60	11	13	14	17
55	75	13	17	18	21
75	100	17	22	25	28
90	125	20	25	27	30
110	150	24	29	33	37
132	180	31	36	38	43
160	218	35	41	44	52
200	274	43	47	53	61
250	340	52	57	63	71
280	380	57	63	70	79
355	482	67	76	86	98
400	544	78	82	97	106
450	610	87	93	107	117

Tab. 1.4.1 - Potenza dei condensatori (kvar) per il rifasamento dei motori trifase 230/400 V

1.4.2 Rifasamento dei trasformatori

Il trasformatore è una macchina elettrica che per ragioni impiantistiche deve rimanere sempre in servizio. E' consigliabile effettuare il rifasamento diretto del trasformatore. La potenza capacitiva necessaria a compensare le perdite del funzionamento a vuoto può essere calcolata utilizzando un coefficiente percentuale dedotto dalla pratica o più semplicemente utilizzando le tabelle fornite dagli stessi costruttori (esistono anche altri metodi di calcolo basati su formule empiriche ma che risultano troppo laboriosi rispetto al metodo pratico proposto). Utilizzando il coefficiente pratico (variabile dal 4% al 6%) è possibile ricavare la potenza reattiva in kvar moltiplicando tale coefficiente per la potenza del trasformatore espressa in kVA .

Esempio 4

Rifasare un trasformatore che presenta le seguenti caratteristiche (fig 1.4.1 C) :

P=630 kVA

V=400 V

Scegliendo un coefficiente percentuale del 5% la potenza reattiva vale:

$$Q = (\text{coefficiente}) \times P = 5\% \times 630 = 31,5 \text{ kvar}$$

Sul catalogo viene scelto un condensatore di 30 kvar a 400V.

1.4.3 Rifasamento degli impianti

Per definire il tipo di rifasamento più appropriato sia sotto l'aspetto tecnico che economico occorre conoscere ubicazione, potenza, contemporaneità di

servizio e grado di utilizzazione dei carichi. Se il tipo di servizio dell'impianto risulta continuativo, con potenza impiegata indicativamente invariata, è possibile avvalersi di apposite tabelle. Queste tabelle forniscono degli opportuni coefficienti che tengono conto del fattore di potenza iniziale e di quello finale desiderato. Moltiplicando tale coefficiente per la potenza attiva si può calcolare la potenza reattiva secondo la seguente relazione:

$$Q = (\text{coefficiente}) \times P$$

Esempio 5a

Rifasare un impianto avente le seguenti caratteristiche: rete trifase con tensione $U_n=400$ V, potenza assorbita $P=100$ kW, fattore di potenza $\cos \varphi_0 = 0,7$, fattore di potenza richiesto $\cos \varphi_1 = 0,9$

Nella tabella 1.4.2 si individuano la riga corrispondente al fattore di potenza richiesto $\cos \varphi_1 = 0,9$ e la colonna corrispondente al fattore di potenza iniziale $\cos \varphi_0 = 0,7$. Si ottiene il coefficiente $k_c = 0,536$ (esempio di scelta di k_c evidenziato in rosso). La batteria di condensatori da installare deve avere una potenza reattiva pari a:

$$Q_c = (Tg \varphi_0 - Tg \varphi_1) \times P$$

$$Q_c = k_c \times P = 0,536 \times 100 = 53,6 \text{ kvar}$$

Esempio 5b

Una cabina di trasformazione MT/BT alimenta alla tensione di 400V diversi carichi elettrici per una potenza complessiva di 550kW. Il fattore di potenza iniziale è 0,75 e si desidera ottenere un fattore di potenza di 0,92. L'installazione dei condensatori avviene secondo le indicazioni riportate nello schema di fig. 1.4.1 D.

La potenza reattiva vale (tab 1.4.2):

$$Q = k_c \times P = 0,453 \times 550 = 249,1 \text{ k var}$$

In considerazione del fatto che l'impianto è a potenza invariabile si può scegliere un condensatore della potenza di 240kVAR. La tabella che segue permette di determinare la potenza reattiva necessaria per aumentare il fattore di potenza dell'impianto al valore desiderato. Il coefficiente k_c esprime la potenza del condensatore in kvar per ogni kW richiesto dal carico.

$$Q_c = k_c \times P \text{ (k var)}$$

Fattore Kc (kvar/kW)														
prima della compensazione		dopo la compensazione												
tgfi	cosfi	0,75	0,59	0,48	0,46	0,43	0,40	0,36	0,33	0,29	0,25	0,20	0,14	0,00
		0,80	0,86	0,90	0,91	0,92	0,93	0,94	0,95	0,96	0,97	0,98	0,99	1,00
2,29	0,40	1,541	1,698	1,807	1,836	1,865	1,896	1,928	1,963	2,000	2,041	2,088	2,149	2,291
2,22	0,41	1,475	1,631	1,740	1,769	1,799	1,829	1,862	1,896	1,933	1,974	2,022	2,082	2,225
2,16	0,42	1,411	1,567	1,676	1,705	1,735	1,766	1,798	1,832	1,869	1,910	1,958	2,018	2,161
2,10	0,43	1,350	1,506	1,615	1,644	1,674	1,704	1,737	1,771	1,808	1,849	1,897	1,957	2,100
2,04	0,44	1,291	1,448	1,557	1,585	1,615	1,646	1,678	1,712	1,749	1,790	1,838	1,898	2,041
1,98	0,45	1,235	1,391	1,500	1,529	1,559	1,589	1,622	1,656	1,693	1,734	1,781	1,842	1,985
1,93	0,46	1,180	1,337	1,446	1,475	1,504	1,535	1,567	1,602	1,639	1,680	1,727	1,788	1,930
1,88	0,47	1,128	1,285	1,394	1,422	1,452	1,483	1,515	1,549	1,586	1,627	1,675	1,736	1,878
1,83	0,48	1,078	1,234	1,343	1,372	1,402	1,432	1,465	1,499	1,536	1,577	1,625	1,685	1,828
1,78	0,49	1,029	1,186	1,295	1,323	1,353	1,384	1,416	1,450	1,487	1,528	1,576	1,637	1,779
1,73	0,50	0,982	1,139	1,248	1,276	1,306	1,337	1,369	1,403	1,440	1,481	1,529	1,590	1,732
1,69	0,51	0,937	1,093	1,202	1,231	1,261	1,291	1,324	1,358	1,395	1,436	1,484	1,544	1,687
1,64	0,52	0,893	1,049	1,158	1,187	1,217	1,247	1,280	1,314	1,351	1,392	1,440	1,500	1,643
1,60	0,53	0,850	1,007	1,116	1,144	1,174	1,205	1,237	1,271	1,308	1,349	1,397	1,458	1,600
1,56	0,54	0,809	0,965	1,074	1,103	1,133	1,163	1,196	1,230	1,267	1,308	1,356	1,416	1,559
1,52	0,55	0,768	0,925	1,034	1,063	1,092	1,123	1,156	1,190	1,227	1,268	1,315	1,376	1,518

1,48	0,56	0,729	0,886	0,995	1,024	1,053	1,084	1,116	1,151	1,188	1,229	1,276	1,337	1,479
1,44	0,57	0,691	0,848	0,957	0,986	1,015	1,046	1,079	1,113	1,150	1,191	1,238	1,299	1,441
1,40	0,58	0,655	0,811	0,920	0,949	0,979	1,009	1,042	1,076	1,113	1,154	1,201	1,262	1,405
1,37	0,59	0,618	0,775	0,884	0,913	0,942	0,973	1,006	1,040	1,077	1,118	1,165	1,226	1,368
1,33	0,60	0,583	0,740	0,849	0,878	0,907	0,938	0,970	1,005	1,042	1,083	1,130	1,191	1,333
1,30	0,61	0,549	0,706	0,815	0,843	0,873	0,904	0,936	0,970	1,007	1,048	1,096	1,157	1,299
1,27	0,62	0,515	0,672	0,781	0,810	0,839	0,870	0,903	0,937	0,974	1,015	1,062	1,123	1,265
1,23	0,63	0,483	0,639	0,748	0,777	0,807	0,837	0,870	0,904	0,941	0,982	1,030	1,090	1,233
1,20	0,64	0,451	0,607	0,716	0,745	0,775	0,805	0,838	0,872	0,909	0,950	0,998	1,058	1,201
1,17	0,65	0,419	0,576	0,685	0,714	0,743	0,774	0,806	0,840	0,877	0,919	0,966	1,027	1,169
1,14	0,66	0,388	0,545	0,654	0,683	0,712	0,743	0,775	0,810	0,847	0,888	0,935	0,996	1,138
1,11	0,67	0,358	0,515	0,624	0,652	0,682	0,713	0,745	0,779	0,816	0,857	0,905	0,966	1,108
1,08	0,68	0,328	0,485	0,594	0,623	0,652	0,683	0,715	0,750	0,787	0,828	0,875	0,936	1,078
1,05	0,69	0,299	0,456	0,565	0,593	0,623	0,654	0,686	0,720	0,757	0,798	0,846	0,907	1,049
1,02	0,70	0,270	0,427	0,536	0,565	0,594	0,625	0,657	0,692	0,729	0,770	0,817	0,878	1,020
0,99	0,71	0,242	0,398	0,508	0,536	0,566	0,597	0,629	0,663	0,700	0,741	0,789	0,849	0,992
0,96	0,72	0,214	0,370	0,480	0,508	0,538	0,569	0,601	0,635	0,672	0,713	0,761	0,821	0,964
0,94	0,73	0,186	0,343	0,452	0,481	0,510	0,541	0,573	0,608	0,645	0,686	0,733	0,794	0,936
0,91	0,74	0,159	0,316	0,425	0,453	0,483	0,514	0,546	0,580	0,617	0,658	0,706	0,766	0,909
0,88	0,75	0,132	0,289	0,398	0,426	0,453	0,487	0,519	0,553	0,590	0,631	0,679	0,739	0,882
0,86	0,76	0,105	0,262	0,371	0,400	0,429	0,460	0,492	0,526	0,563	0,605	0,652	0,713	0,855.
0,83	0,77	0,079	0,235	0,344	0,373	0,403	0,433	0,466	0,500	0,537	0,578	0,626	0,686	0,829
0,80	0,78	0,052	0,209	0,318	0,347	0,376	0,407	0,439	0,474	0,511	0,552	0,599	0,660	0,802
0,78	0,79	0,026	0,183	0,292	0,320	0,350	0,381	0,413	0,447	0,484	0,525	0,573	0,634	0,776
0,75	0,80		0,157	0,266	0,294	0,324	0,355	0,387	0,421	0,458	0,499	0,547	0,608	0,750
0,72	0,81		0,131	0,240	0,268	0,298	0,329	0,361	0,395	0,432	0,473	0,521	0,581	0,724
0,70	0,82		0,105	0,214	0,242	0,272	0,303	0,335	0,369	0,406	0,447	0,495	0,556	0,698
0,67	0,83		0,079	0,188	0,216	0,246	0,277	0,309	0,343	0,380	0,421	0,469	0,530	0,672
0,65	0,84		0,053	0,162	0,190	0,220	0,251	0,283	0,317	0,354	0,395	0,443	0,503	0,646
0,62	0,85		0,026	0,135	0,164	0,194	0,225	0,257	0,291	0,328	0,369	0,417	0,477	0,620
0,59	0,86			0,109	0,138	0,167	0,198	0,230	0,265	0,302	0,343	0,390	0,451	0,593
0,57	0,87			0,082	0,111	0,141	0,172	0,204	0,238	0,275	0,316	0,364	0,424	0,567
0,54	0,88			0,055	0,084	0,114	0,145	0,177	0,211	0,248	0,289	0,337	0,397	0,540
0,51	0,89			0,028	0,057	0,086	0,117	0,149	0,184	0,221	0,262	0,309	0,370	0,512
0,48	0,90				0,029	0,058	0,089	0,121	0,156	0,193	0,234	0,281	0,342	0,484

Tab. 1.4.2 - Coefficienti di correzione del fattore di potenza

1.5 Il problema delle armoniche

La presenza di utilizzatori di tipo elettromagnetico come motori, elettromagneti, induttanze e di componenti elettronici a comportamento non lineare implica la circolazione di correnti armoniche nella rete elettrica. Tali correnti, attraverso l'impedenza di linea, si traducono in tensioni aventi una frequenza multipla della fondamentale. Queste tensioni si sovrappongono alla fondamentale determinando una distorsione della forma d'onda finale che, risultando non più sinusoidale, crea disturbi alla rete elettrica. Dalla teoria è noto che qualsiasi forma d'onda periodica può sempre ricondursi alla sovrapposizione di un'onda sinusoidale della stessa frequenza denominata "onda fondamentale" e di altre onde sinusoidali di frequenza doppia, tripla, ecc.. In figura 1.5.1 è rappresentata una tensione di 3^a armonica (V_{n3}) sovrapposta ad una fondamentale (V_{n1}) anche se in realtà sono presenti più armoniche di ampiezza rilevante.

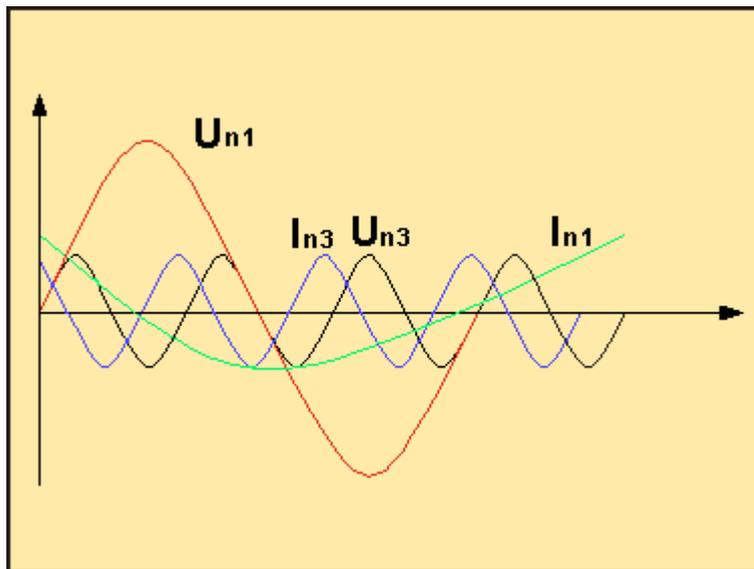


Fig. 1.5.1 - La corrente aumenta con la presenza delle armoniche.

$$I_{n1} = \omega_1 C V_{n1} I_{n3} = \omega_3 C V_{n3} = 3\omega_1 C V_{n3} I_{tot} = \sqrt{I_{n1}^2 + I_{n3}^2}$$

$$f_r = f_1 \times \left(\frac{P_{cc}}{Q_c} \right)^{0.5}$$

dove:

f_1 = frequenza della fondamentale ;

f_r = frequenza di risonanza;

P_{cc} = potenza di corto circuito nel punto in cui sono installati i condensatori di rifasamento;

Q_c = potenza di rifasamento.

Dalla stessa si può ottenere l'ordine dell'armonica f_r/f_1 :

$$k_2 = \left(\frac{P_{cc}}{Q_c} \right)^{0.5}$$

Nel caso di rifasamento automatico la verifica andrà ripetuta per tutti i valori possibili di Q_c

I condensatori sono caratterizzati da un coefficiente di amplificazione d'armonica (k) che varia caso per caso e il cui andamento è riportato in figura 1.5.2. Per questo motivo non è sufficiente che il valore di h non coincida con quello di un'armonica esistente per escludere il pericolo di risonanza ,ma che le armoniche esistenti cadano dentro la curva di amplificazione perché si creino situazioni pericolose. Utilizzando opportuni filtri si può stringere la curva riducendo l'intervallo entro cui possono innescarsi le risonanze (figura 1.5.3)

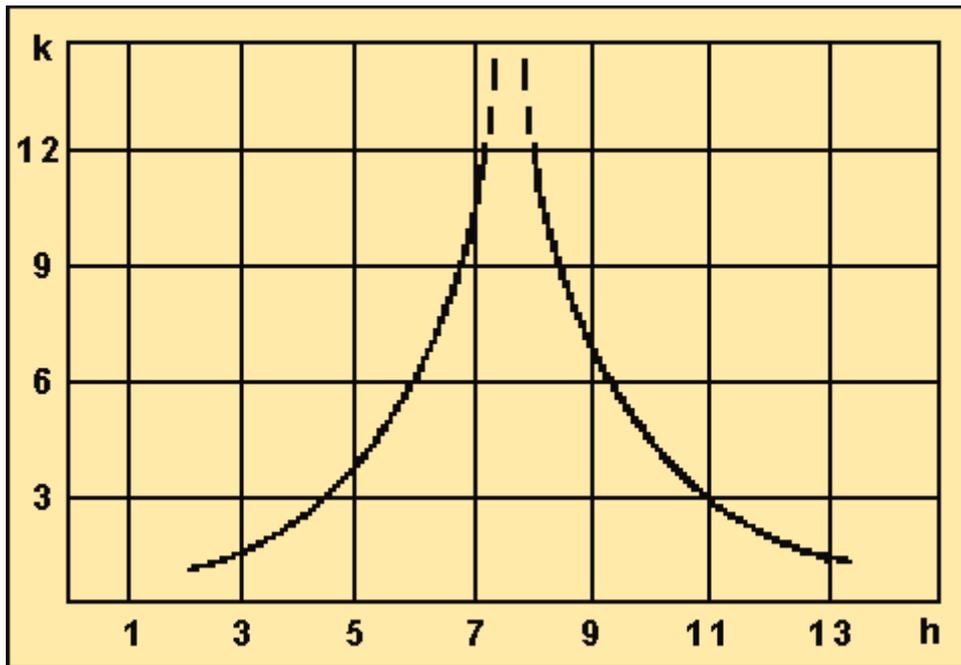


Fig. 1.5.2 - Coefficiente di amplificazione di armonica in funzione dell'ordine di armonica

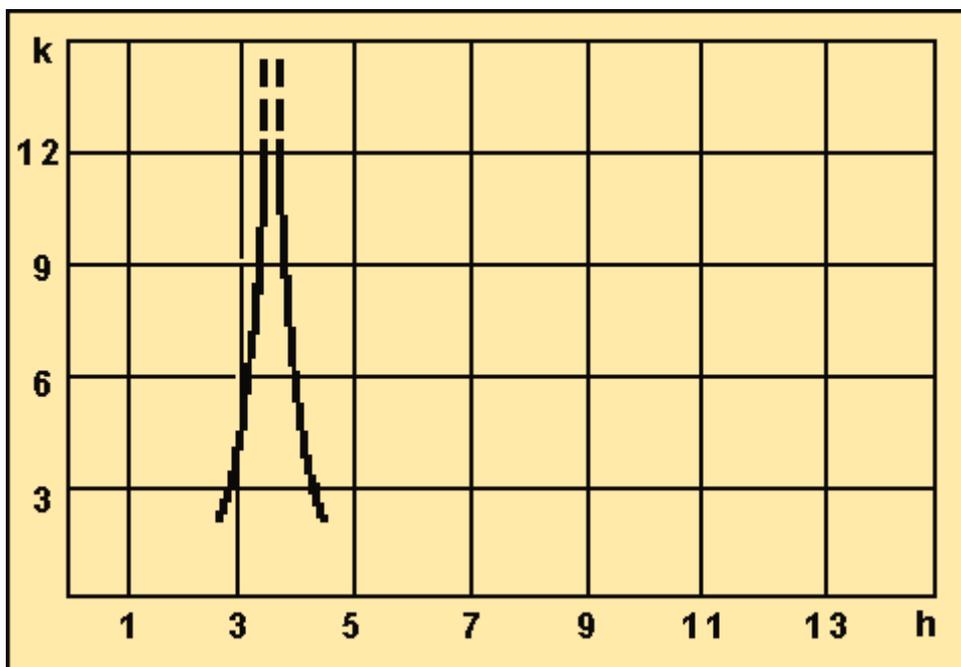


Fig. 1.5.3 - Effetto del reattore sul coefficiente di amplificazione di armonica

1.6 Sezione dei cavi di alimentazione

Nel dimensionamento dei cavi di alimentazione, come detto in precedenza, è consigliabile maggiorare la corrente assorbita dal condensatore di un 30%, per tenere conto delle armoniche, e di un 10% per tenere conto della tolleranza sul valore nominale di capacità del condensatore. In conseguenza di ciò i cavi possono essere dimensionati per una corrente pari a:

$$I_B = 1,3 \times 1,10 \times I_C = 1,43 I_C$$

dove:

I_B è la massima corrente assorbita dal condensatore

I_C è la corrente assorbita dal condensatore alimentato alla tensione dell'impianto U_n

$$I_C = \frac{Q_C}{\sqrt{3} \times U_n} = \frac{Q_{nc} \times \left(\frac{U_n}{U_{nc}} \right)^2}{\sqrt{3} \times U_n}$$

U_{nc} è la tensione nominale della batteria di condensatori

U_n è la tensione nominale di alimentazione

<i>Potenza a batterie a (kvar)</i>	<i>Sezione dei conduttori</i>	<i>Corrente nominale interruttore e (A)</i>
	<i>Isolamento</i> <i>XPR - XLPE PVC</i>	

10	2,5	2,5	25
15	2,5	4	32
20	4	6	50
25	6	10	63
40	10	16	100
50	16	25	125
60	25	35	125
75	35	50	160
80	35	50	200
100	50	70	250
125	70	95	320
150	95	150	320
175	120	185	400
200	150	240	500
225	185	300	500
350	2X120	2X185	800

Tab. 1.7.1 - Sezione minima dei conduttori di collegamento delle batterie di condensatori ($U=400\text{ V}$)

1.7 Apparecchi di protezione e comando

Un condensatore alimentato in corrente continua, all'atto della carica, assorbe una corrente iniziale pari a V/R dove R è la resistenza del circuito di carica. Essendo la resistenza un valore molto piccolo, nel primo istante si possono avere correnti molto elevate (per un periodo pari a quello necessario per la carica l'inserzione del condensatore equivale ad un corto circuito). Un fenomeno simile, anche se i parametri di calcolo sono diversi (la corrente di spunto è funzione dell'impedenza della rete, dell'eventuale presenza di altre batterie di condensatori elettricamente vicine e delle eventuali induttanze di smorzamento), si ha anche in corrente alternata. La corrente di inserzione I_{sc} dipende dal tipo e dalla capacità del condensatore (singolo o in batteria automatica) nonché dalla induttanza della rete a monte del condensatore. In conseguenza di ciò l'interruttore automatico o il fusibile per la protezione esterna contro il corto circuito dovrà avere le seguenti caratteristiche: una soglia di intervento istantaneo elevata tale da permettere l'assorbimento delle correnti di spunto, la cui durata può essere dell'ordine di qualche semiperiodo (10-20 ms) (per limitare la corrente di inserzione possono essere consigliabili anche induttanze di limitazione); devono consentire l'assorbimento di lievi sovraccarichi dovuti a sovratensioni transitorie (tab. 1.7.1). In genere questo si ottiene scegliendo l'interruttore automatico con una corrente nominale e una soglia magnetica

tali da evitare scatti intempestivi della protezione termica ($I_n=1,43I_{nc}$ fig. 1.7.1) e da permettere la messa in tensione del condensatore ; devono avere un potere d'interruzione non inferiore alla corrente di corto circuito presunta nel punto di installazione del condensatore (per quanto concerne gli interruttori automatici si può considerare, con un buon margine di sicurezza, che non si abbia l'intervento quando la corrente di spunto del condensatore non supera la soglia di intervento magnetico I_{m2} fig. 1.7.1). Oltre a questo è necessario attuare la protezione contro la permanenza di tensione dopo il sezionamento per mezzo di resistenze di scarica poste in parallelo al condensatore tali che dopo 5s la tensione residua non superi i 50V; ciò si ottiene sicuramente se R_c è minore di 50 ohm. I condensatori possono essere soggetti a sovraccarichi se la tensione di alimentazione è superiore a quella di rete. Dal momento che sono per costruzione ammissibili sovraccarichi fino a circa $1,5 I_{nc}$ in genere questa protezione non è necessaria. Possono invece verificarsi cortocircuiti di qualche elemento interno che devono essere tempestivamente eliminati per evitare il fuori servizio di tutta la batteria. Normalmente i condensatori sono protetti da questi inconvenienti da protezioni interne che possono essere fusibili rispondenti alle Norme CEI 33-1, contatti termici e dispositivi antiscoppio. Riassumendo:

$$I_{ni} \geq 1,43I_{nc} \quad (1.7.1)$$

$$I_{m2} \geq I_{nc} \quad (1.7.2)$$

Dalla 1.7.1 si rileva che ogni interruttore è idoneo a manovrare batterie di condensatori aventi correnti nominali I_{nc} fino a:

$$I_{nc} = \frac{1}{1,43} \times I_{ni} = 0,7I_{ni}$$

cioè può essere usato fino al 70% della propria corrente nominale I_{ni} . Dalla 1.7.2 infine si deduce che la scelta dell'interruttore dovrà essere eseguita tenendo conto anche del valore della corrente di corto circuito presunta a valle dell'interruttore. Pertanto , a parità di corrente nominale, deve essere scelto un interruttore avente un adeguato potere d'interruzione.

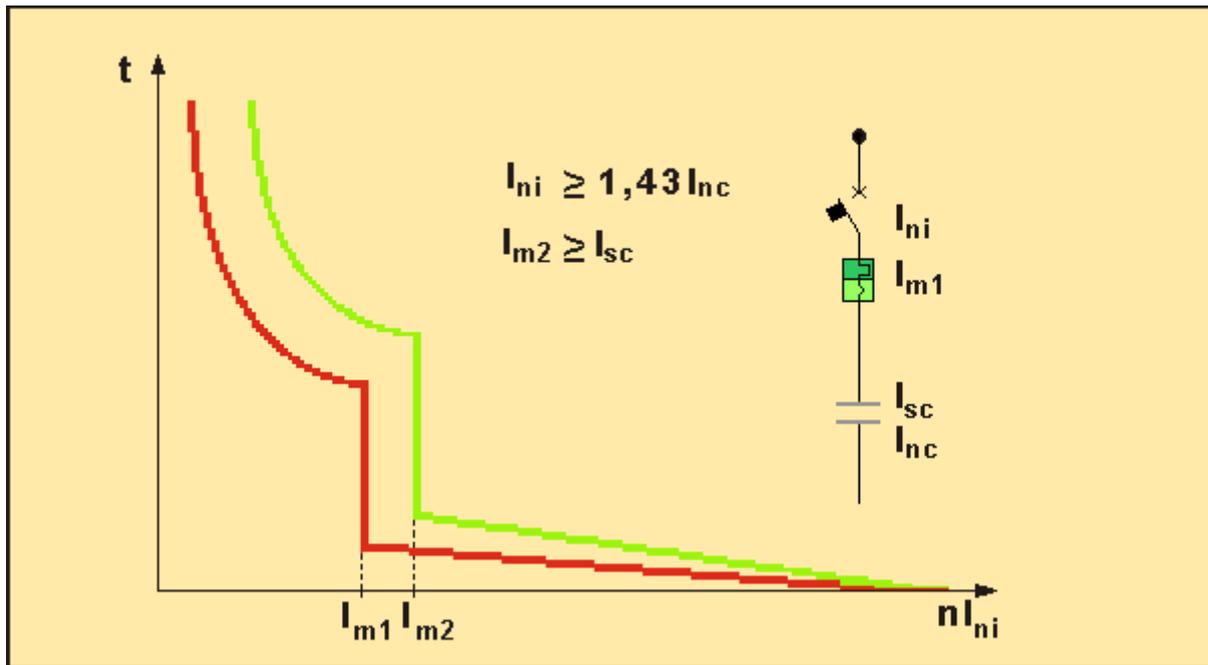


Fig. 1.7.1 - Condizioni di scelta dei dispositivi di protezione esterni

%	+1	+1	+2	+3
sovratensione	0	5	0	0
e	%	%	%	%
durata massima sulle 24 ore	8h	0,5 h	5 min	1 min

Tab. 1.7.2 - Sovratensioni ammissibili per i condensatori di rifasamento

1.8 Criteri d'installazione e manutenzione

I condensatori soffrono soprattutto delle sovratemperature causate da non adeguata ventilazione o da irraggiamento solare. Per questo motivo il locale in cui installare i condensatori deve essere ubicato in luogo fresco e ben ventilato con una distanza fra i vari elementi e dal pavimento non inferiore ai 3-4 cm. Quando questo non è possibile (installazione all'interno di quadri) si può aumentare la tensione nominale della batteria del 20-30% ottenendo in tal modo una minore potenza specifica e di conseguenza una diminuzione della temperatura. Periodicamente si devono pulire gli isolatori ed è utile il controllo periodico della temperatura delle custodie dei condensatori. La verifica ad intervalli regolari della potenza assorbita dal condensatore e dalla batteria permette di accertare, se la potenza assorbita è inferiore a quella nominale, l'eventuale danneggiamento del dielettrico.

Per motivi di sicurezza delle persone i morsetti dei condensatori devono essere collegati in cortocircuito tra loro e la terra quando si devono praticare operazioni di manutenzione.

Rifasamento industriale per impianti trifase con potenza di fornitura e di contratto superiori a 15 kW

E = Energia attiva consumata base mese in kWh, misurata dal relativo contatore

E Q = Ene. reattiva scambiata dall'utenza e misurata dal contatore, base mese in kvarh

Condizioni:	$E Q \leq 0,5 * E$	nessun addebito	
	$0,5 * E < E Q \leq 0,75 * E$	$E \text{ add} = E Q - 0,5 * E$	al prezzo $c1=0,08$ €/kWh
	$0,75 * E < E Q \leq E$	$E \text{ add} = E Q - 0,5 * E$	al prezzo $c2=0,12$ €/kWh $c2 > c1$
	$E Q > E$	può imporre il rifasamento	

La prima condizione considera un angolo limite di 26 gradi, a cui corrisponde un $\cos \varphi = 0,89879$

L'ultima condizione si ha per $\cos \varphi < 0,7071$ e angoli maggiori di 45 gradi. nota: c1 e c2 elementi variabili