

RIFASAMENTO DI CARICHI INDUTTIVI

Sommario

1. PRINCIPIO DEL RIFASAMENTO	3
1.1. NECESSITÀ DEL RIFASAMENTO	3
1.2. SCHEMA DI PRINCIPIO.....	3
1.3. CALCOLO DELLA POTENZA DI RIFASAMENTO E DELLA CAPACITÀ DEL CONDENSATORE.....	5
1.4. ESERCIZIO	5
2. CRITERI DI RIFASAMENTO	7
2.1. INDICAZIONI GENERALI	7
2.2. VINCOLI E TARIFFAZIONI IMPOSTE DALL'ENTE ELETTRICO ITALIANO	7
2.3. CRITERIO DI CONVENIENZA DELLA DISTRIBUZIONE ALTERNATA TRIFASE VERSO LA DISTRIBUZIONE IN CONTINUA	7
3. RIFASAMENTO DI CARICHI TRIFASE	9
4. EFFETTO DI INNALZAMENTO DELLA TENSIONE DI LINEA	11
5. CENNI IMPIANTISTICI.....	13
5.1. CARATTERISTICHE DEI CONDENSATORI INDUSTRIALI	13
5.2. STRUTTURA DI PRINCIPIO DEI BANCHI DI RIFASAMENTO.....	14
5.3. RESISTENZE DI SCARICA	14
6. RIFASAMENTO DI CARICHI VARIABILI.....	16
6.1. RIFASAMENTO MEDIO	16
6.2. INSERZIONE CONTROLLATA DI BANCHI DI CONDENSATORI.....	16
6.3. COMPENSATORI STATICI.....	17
7. RIFASAMENTO FILTRATO.....	19

1. PRINCIPIO DEL RIFASAMENTO

1.1. Necessità del rifasamento

In un impianto elettrico civile o industriale gli utilizzatori presentano usualmente due tipologie di carichi: resistivi puri o resistivo-induttivi. In questo secondo caso il generatore si trova ad erogare, oltre alla potenza attiva necessaria a compiere il lavoro, anche una potenza reattiva, la cui entità dipende dal fattore di potenza del carico.

Infatti

$$P = V \cdot I \cdot \cos \phi \qquad Q = V \cdot I \cdot \sin \phi$$

con P potenza attiva [W], Q potenza reattiva [VAR], V tensione sul carico [V], I corrente sul carico [A], $\cos \phi$ fattore di potenza del carico.

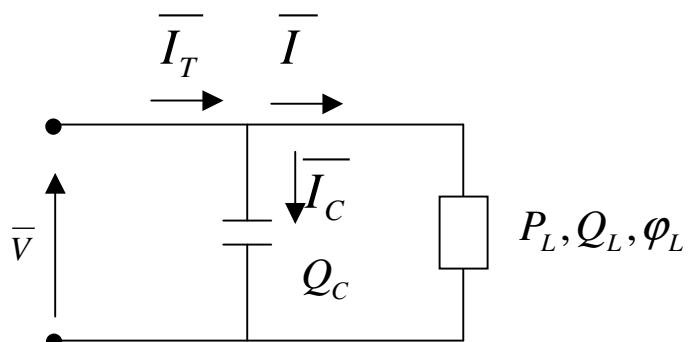
All'aumentare della componente induttiva ($\cos \phi$ decrescenti) aumenta anche la potenza reattiva. Questa deve essere presa in considerazione per il dimensionamento dell'impianto di distribuzione e produce comunque perdite per effetto Joule sulle linee di distribuzione:

$$I = \frac{P}{V \cdot \cos \phi}$$

Per *rifasamento* di un carico si intende la riduzione dell'angolo di sfasamento tra tensione e corrente.

1.2. Schema di principio

Il rifasamento di un carico induttivo si ottiene ponendo in parallelo al carico un condensatore di opportuna capacità.

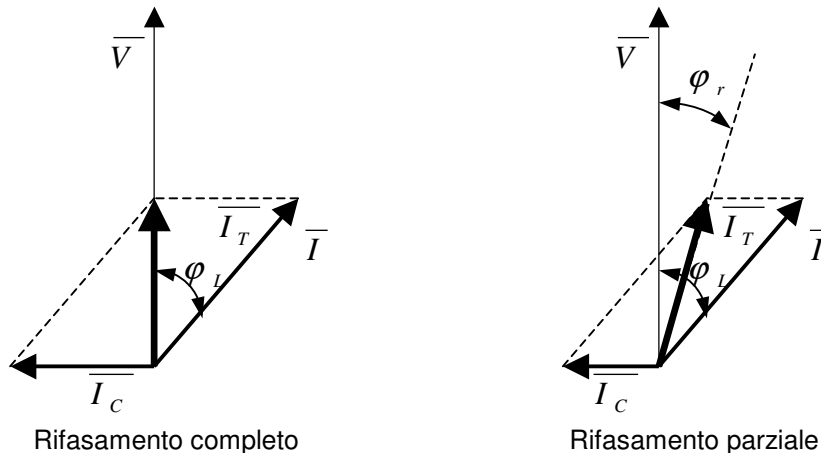


Ricordiamo il *teorema di Boucherot*: in una rete di bipoli passivi

1. la potenza attiva totale è pari alla somma aritmetica delle varie potenze attive;
2. la potenza reattiva totale è uguale alla somma algebrica delle varie potenze reattive, considerando con segno positivo quelle induttive e con segno negativo quelle capacitive;
3. la potenza apparente totale è data dalla somma vettoriale delle varie potenze apparenti, considerate come numeri complessi.

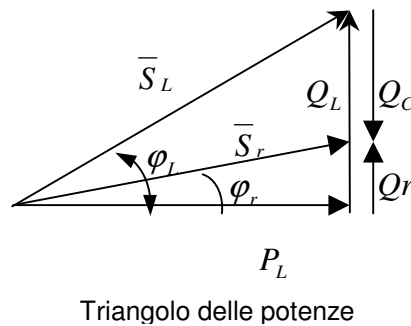
La potenza reattiva assorbita dal condensatore compensa quindi la potenza reattiva assorbita dall'induttore. Se la potenza reattiva complessiva viene annullata si parla di compensazione completa, altrimenti si parla di compensazione parziale.

Vediamo l'effetto del rifasamento nel diagramma vettoriale della tensione e delle correnti:



Nel caso di rifasamento completo, la corrente induttiva di carico \bar{I} si compone con la corrente capacitiva \bar{I}_C e dà come somma una corrente \bar{I}_T priva di componenti reattive. Nel caso di rifasamento parziale, la corrente somma conserva una componente reattiva, minore però della corrente di carico.

Rivediamo il medesimo effetto nel triangolo delle potenze (caso di rifasamento parziale).



Triangolo delle potenze

Il carico assorbe una potenza attiva P_L e una potenza reattiva induttiva Q_L , la cui somma vettoriale dà la potenza apparente S_L ($\cos\phi_L$ è il fattore di potenza del carico). Il condensatore apporta una potenza reattiva capacitiva Q_C , che si sottrae alla potenza reattiva del carico fornendo come risultante la potenza reattiva induttiva Q_r , a cui corrispondono una potenza apparente S_r , minore di S_L , e un fattore di potenza $\cos\phi_r$, maggiore di $\cos\phi_L$.

1.3. Calcolo della potenza di rifasamento e della capacità del condensatore

Il calcolo della potenza di rifasamento necessaria a modificare il $\cos\varphi$ di un carico da un valore $\cos\varphi_L$ a un valore $\cos\varphi_r$ si può facilmente desumere dal triangolo delle potenze.

Infatti, ricordando che $\operatorname{tg}\varphi = \frac{Q}{P}$ e che quindi $Q = P \cdot \operatorname{tg}\varphi$, si trova

$$Q_C = Q_L - Q_r = P_L \cdot \operatorname{tg}\varphi_L - P_L \cdot \operatorname{tg}\varphi_r = P_L \cdot (\operatorname{tg}\varphi_L - \operatorname{tg}\varphi_r)$$

Il valore della capacità si trova ricordando che $Q_C = \frac{V^2}{X_C} = V^2 \cdot \omega C = V^2 \cdot 2\pi f C$, da cui

$$C = \frac{Q_C}{2\pi f V^2}$$

La corrente che attraversa il condensatore si trova ricordando un'altra espressione della potenza reattiva: $Q_C = V \cdot I_C$, da cui

$$I_C = \frac{Q_C}{V}$$

1.4. Esercizio

Si riporta lo svolgimento dell'esempio 13, cap.15, riportato nel testo G.Conte, Elettrotecnica, Hoepli.

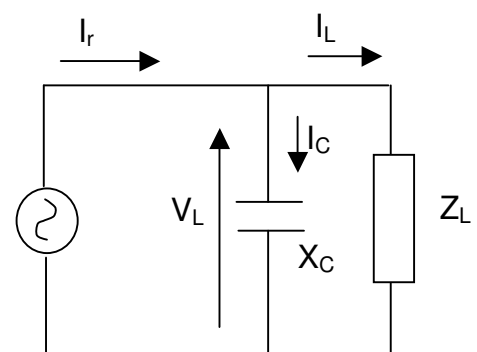
Dato un carico alimentato a 230 V che assorbe 3000 W di potenza attiva a $\cos\varphi$ 0.65, dimensionare il rifasamento per portare il $\cos\varphi$ al valore di 0.92. Calcolare le correnti in gioco nel circuito.

Dati del problema:

P_L	3000	W	potenza attiva assorbita dal carico
cosφ_L	0,65		cosφ del carico
V_L	230	V	tensione di alimentazione
cosφ_r	0,92		cosφ desiderato
f	50	Hz	frequenza dell'alimentazione

Calcoli richiesti:

Q_C	potenza reattiva del rifasamento
C	capacità del rifasamento
I_L	corrente sul carico
I_C	corrente sul condensatore
I_r	corrente circolante sulla linea



La potenza del rifasamento è presto calcolata:

$$Q_C = P_L \cdot (tg \phi_L - tg \phi_r) = 2229 \text{ VAR}$$

Ricordando che

$$Q_C = \frac{V^2}{X_C} = \frac{V^2}{1/\omega C} = V^2 \cdot 2\pi f \cdot C$$

calcolo il valore della capacità

$$C = \frac{Q_C}{2\pi f \cdot V^2} = 134 \mu F$$

Per trovare le correnti, è possibile analizzare il circuito con il metodo simbolico oppure si può passare attraverso il calcolo delle potenze apparenti.

Adottiamo questa seconda strada:

Da $S_r = V_L \cdot I_r$ ricaviamo $I_r = \frac{S_r}{V_L}$.

Da $S_L = V_L \cdot I_L$ ricaviamo $I_L = \frac{S_L}{V_L}$.

Ma $S_r = \sqrt{P_L^2 + Q_r^2}$ e $S_L = \sqrt{P_L^2 + Q_L^2}$.

Ora, per il teorema di Boucherot, $Q_r = Q_L - Q_C = 1278 \text{ VAR}$

Quindi $S_r = 3261 \text{ VA}$ e $S_L = 4615 \text{ VA}$, da cui

$$I_L = 20.1 \text{ A e vettorialmente } \overline{I_L} = 13.04 + j15.25 \text{ A}$$

$$I_r = 14.2 \text{ A e vettorialmente } \overline{I_r} = 13.04 + j5.56 \text{ A}$$

La corrente che circola nel condensatore si può calcolare da

$$I_C = \frac{V_L}{Z_C} \quad \text{dove} \quad Z_C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C} = 23.73 \Omega$$

quindi $I_C = 9.69 \text{ A}$.

Dalla potenza apparente sul carico, è possibile ricavare l'impedenza del carico stesso.

Infatti ricordando che $S_L = \frac{V_L^2}{Z_L}$ si ottiene

$$Z_L = \frac{V_L^2}{S_L} = 11.46 \Omega \text{ e vettorialmente } \overline{Z_L} = 7.45 + j8.71 \Omega$$

2. CRITERI DI RIFASAMENTO

2.1. Indicazioni generali

A prima vista potrebbe sembrare che il rifasamento completo rappresenti la soluzione ottimale per il dimensionamento degli impianti di rifasamento, dal momento che annulla la potenza reattiva trasmessa sulla linea.

Tuttavia nella normale pratica industriale, si utilizza sempre il rifasamento parziale per una serie di motivi:

- il beneficio del rifasamento riguarda la rete di distribuzione dell'energia e quindi interessa direttamente l'Ente elettrico, mentre per l'utente finale il rifasamento rappresenta un costo, che va mantenuto il più basso possibile, compatibilmente con i vincoli imposti dall'Ente elettrico (quindi si cerca di mantenere bassa la potenza dell'impianto di rifasamento);
- nel caso ipotetico di rifasamento completo, una variazione del carico o dei parametri dell'impianto può risultare in un sovrarifasamento (carico capacitivo sulla rete), fortemente penalizzato dall'Ente elettrico, in quanto, come si vedrà, causa di pericolose sovratensioni sulla linea;
- le tolleranze di costruzione dei condensatori non consentono un dimensionamento estremamente preciso dei banchi.

2.2. Vincoli e tariffazioni imposte dall'Ente elettrico italiano

L'Ente elettrico italiano prevede l'addebito dell'energia reattiva per tutte le utenze in bassa tensione con potenza contrattuale maggiore di 10 kW. Per il calcolo degli addebiti vengono valutate l'energia attiva (E) e l'energia reattiva (E_Q) prelevate nel mese.

Lo schema utilizzato è il seguente:

energia reattiva prelevata	cos ϕ medio	addebito
$E_Q \leq 0.5 E$	circa 0.9	nessun addebito
$0.5 E < E_Q \leq 0.75 E$	0.8	addebito a tariffa c1 dell'energia $E_{add} = E_Q - 0.5 E$
$0.75 E < E_Q \leq E$	circa 0.7	addebito a tariffa c2 > c1 dell'energia $E_{add} = E_Q - 0.5 E$
$E_Q > E$	< 0.7	richiesto il rifasamento

Si vede che il rifasamento è richiesto per cos ϕ inferiori a 0.7, ma può essere conveniente anche per cos ϕ inferiori a 0.9.

2.3. Criterio di convenienza della distribuzione alternata trifase verso la distribuzione in continua

Il limite di cos ϕ 0.9 imposto dagli enti elettrici non è arbitrario, ma corrisponde circa al limite di convenienza della distribuzione elettrica in regime alternato trifase nei confronti della distribuzione elettrica in continua.

Per verificarlo, valutiamo il peso del materiale conduttore utilizzato (che incide non solo sul costo del conduttore, ma anche su quello dei sostegni, della posa in opera, etc.).

Il confronto tra i due sistemi deve essere effettuato rispettando le seguenti ipotesi:

- parità della potenza trasmessa P
- parità della tensione di trasmissione V
- parità della lunghezza della linea L
- parità della potenza dissipata sulla linea Δp
- parità di conduttore (stesso peso specifico γ e stessa resistività ρ)

Corrente continua

Indichiamo con R_l la resistenza di linea relativa ad un conduttore, con I la corrente di linea, con S la sezione del conduttore. La potenza persa per i due conduttori è data da

$$\Delta p = 2 R_l I^2$$

Sostituendo $R_l = \rho L / S$ e $I = P / V$ si ottiene

$$\Delta p = \frac{2\rho L}{S} \cdot \frac{P^2}{V^2} \quad \text{da cui} \quad S = \frac{2\rho L}{\Delta p} \cdot \frac{P^2}{V^2}$$

Il peso totale G_{cc} dei conduttori per la linea in continua è dato da

$$G_{cc} = 2LS\gamma = 2L \frac{2\rho L}{\Delta p} \cdot \frac{P^2}{V^2} \gamma = \frac{4\gamma\rho L^2 P^2}{\Delta p V^2} = 4k \quad \text{con} \quad k = \frac{\gamma\rho L^2 P^2}{\Delta p V^2}$$

Alternata trifase (a 3 fili)

Si utilizzano 3 conduttori, per cui $\Delta p = 3 R_l I^2$, con $R_l = \rho L / S$ e $I = \frac{P}{\sqrt{3} V \cos \varphi}$.

Sostituendo si ottiene

$$\Delta p = 3 R_l \left(\frac{P}{\sqrt{3} V \cos \varphi} \right)^2 = \frac{\rho L P^2}{S V^2 \cos^2 \varphi} \quad \text{da cui} \quad S = 3 R_l \left(\frac{P}{\sqrt{3} V \cos \varphi} \right)^2 = \frac{\rho L P^2}{\Delta p V^2 \cos^2 \varphi}$$

Il peso dei tre conduttori è dato da

$$G_{tr} = 3LS\gamma = 3L \frac{\rho L P^2}{\Delta p V^2 \cos^2 \varphi} \gamma = \frac{3}{\cos^2 \varphi} \frac{\gamma\rho L^2 P^2}{\Delta p V^2} = \frac{3}{\cos^2 \varphi} k \quad \text{con} \quad k = \frac{\gamma\rho L^2 P^2}{\Delta p V^2}$$

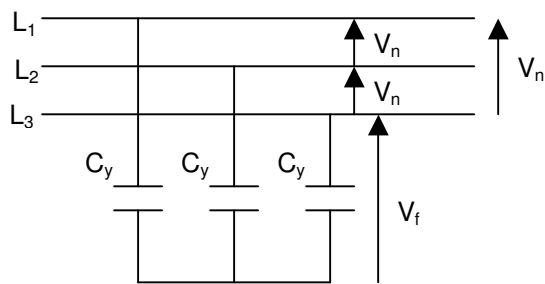
Confrontando le espressioni di G_{cc} e G_{tr} , si ottiene che $G_{tr} < G_{cc}$ se

$$\frac{3}{\cos^2 \varphi} k < 4k$$

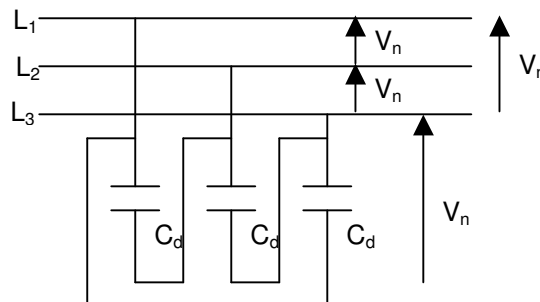
da cui $\cos^2 \varphi > \frac{3}{4}$ ovvero $\cos \varphi > \frac{\sqrt{3}}{2} = 0.87$

3. RIFASAMENTO DI CARICHI TRIFASE

Come qualsiasi altro carico, in regime sinusoidale trifase un banco di rifasamento può presentare due configurazioni, secondo che i banchi delle singole fasi siano collegati a stella o a triangolo.



Collegamento a stella



Collegamento a triangolo

Nel caso di collegamento a stella, i condensatori sono sottoposti alla tensione di fase, che è $\sqrt{3}$ volte minore della tensione di linea, mentre nel caso di collegamento a triangolo i condensatori sono sottoposti all'intera tensione di linea.

Si modificano di conseguenza le espressioni delle potenze reattive impegnate nelle due configurazioni.

Nel caso del collegamento a stella, la potenza reattiva è data da

$$Q_n = 3 \left(\frac{V_n}{\sqrt{3}} \right)^2 \cdot \omega \cdot C = V_n^2 \cdot \omega \cdot C \quad \text{da cui} \quad C = \frac{Q_n}{V_n^2 \cdot \omega}$$

Nel caso del collegamento a triangolo, la potenza reattiva si calcola invece

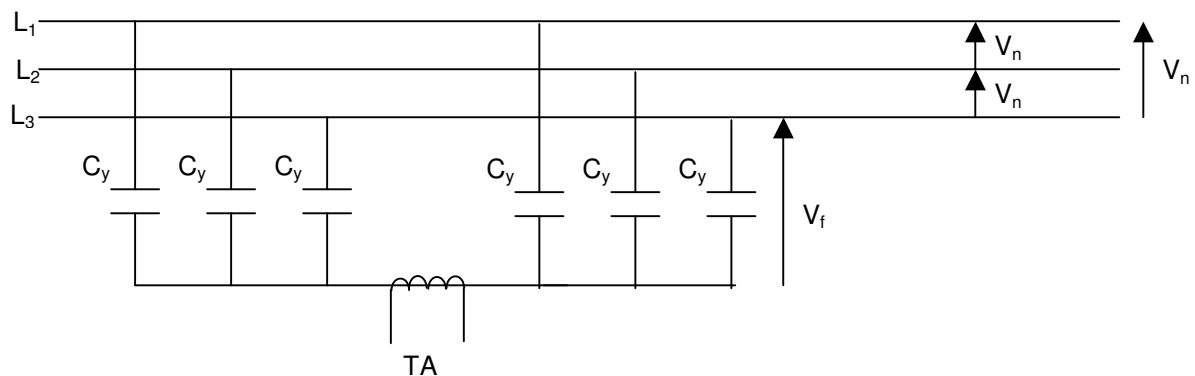
$$Q_n = 3 \cdot V_n^2 \cdot \omega \cdot C \quad \text{da cui} \quad C = \frac{1}{3} \cdot \frac{Q_n}{V_n^2 \cdot \omega}$$

Si verifica immediatamente che a parità di potenza reattiva il collegamento a stella richiede una capacità $\sqrt{3}$ volte maggiore che nel collegamento a triangolo (ovvero, a parità di capacità viene fornita una potenza reattiva $\sqrt{3}$ volte minore).

Alla luce di queste considerazioni, si preferisce adottare una configurazione a triangolo nel caso di rifasamento in bassa tensione, mentre si riserva la configurazione a stella nel caso di rifasamento in media o alta tensione.

Da notare che il collegamento a stella fornisce una semplice e sensibile possibilità diagnostica (ad esempio, per rilevare un eventuale guasto di un condensatore). Si supponga di suddividere i banchi di rifasamento in due parti disposte in parallelo (ciascuna delle quali collegata a stella). I centri stella dei due banchi siano uniti da un conduttore. In condizioni di simmetria dei due banchi, la corrente nel conduttore è nulla in qualsiasi considerazione di carico, in quanto i centri stella assumono sempre il medesimo potenziale. Una pur piccola dissimmetria dei banchi (ad esempio, dovuta al guasto di un

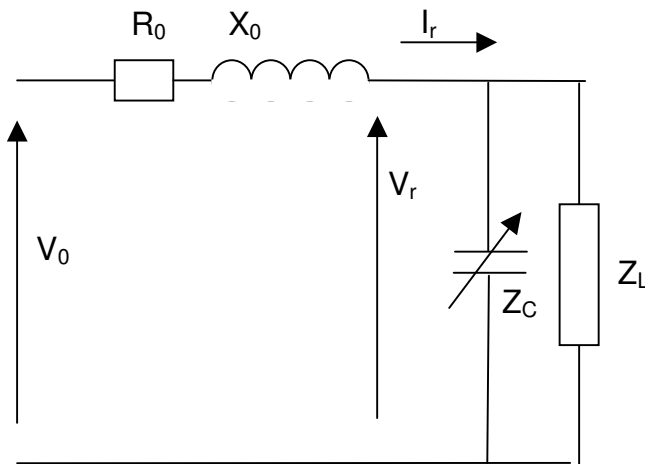
condensatore) determina invece il passaggio di una corrente attraverso il conduttore, rilevabile attraverso un trasformatore amperometrico.



4. EFFETTO DI INNALZAMENTO DELLA TENSIONE DI LINEA

Consideriamo un carico ohmico-induttivo di impedenza Z_L (fattore di potenza $\cos\varphi_L$), in parallelo ad un condensatore di rifasamento variabile di impedenza Z_C , alimentato da una linea elettrica avente un'impedenza ohmico-induttiva $Z_0 = R_0 + j X_0$, con tensione a vuoto V_0 . Sia Z_r l'impedenza risultante dal parallelo del carico e del rifasamento e sia $\cos\varphi_r$ il suo fattore di potenza.

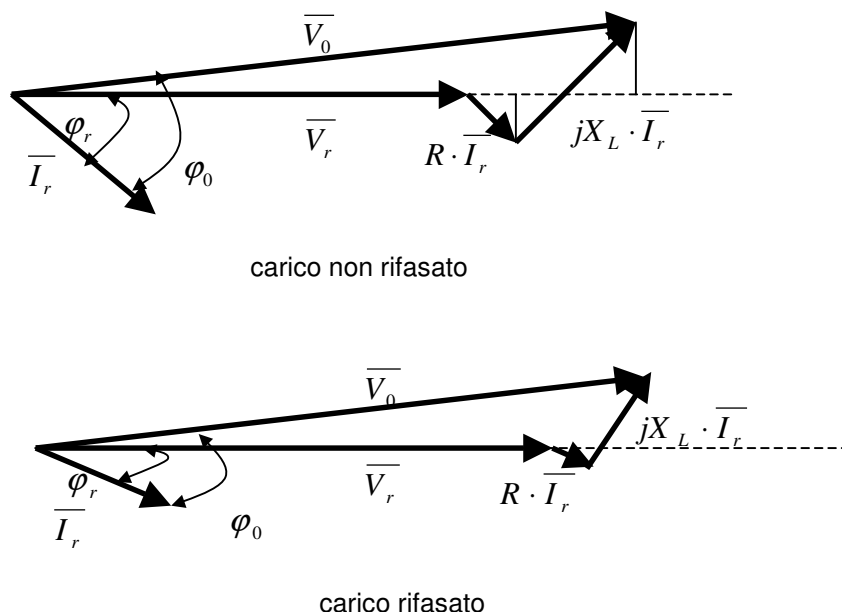
La configurazione è la seguente:



La tensione V_r risulterà inferiore alla tensione V_0 a causa della caduta di tensione sull'impedenza della linea provocata dalla corrente I_r . La caduta di tensione ΔV può essere valutata in modo approssimato dalla formula della "caduta di tensione industriale":

$$\Delta V = I_r \cdot (R_L \cdot \cos \varphi_r + X_L \cdot \sin \varphi_r)$$

Consideriamo i diagrammi vettoriali relativi a due condizioni di rifasamento (carico non rifasato, carico rifasato).

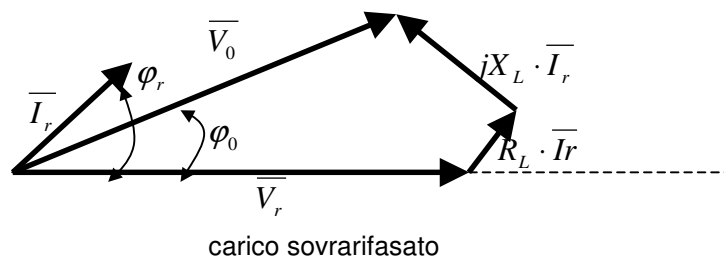


Il rifasamento diminuisce il modulo della corrente I_r e l'angolo di fase rispetto alla tensione. Si vede che l'effetto del rifasamento è di aumentare il modulo della tensione V_r .

In generale, l'incremento di tensione nel punto di inserimento di un banco di condensatori si può valutare in forma approssimata calcolando il rapporto tra la potenza del rifasamento e la potenza di corto circuito della linea nel punto di inserzione:

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{Q_c}{P_{cc,0}}$$

Se invece l'impedenza di carico è di tipo capacitivo, la tensione V_r diventa addirittura maggiore di V_0 .



Questo effetto viene denominato "effetto Ferranti". Si vede che, nel caso di carichi sovrarifasati, si vengono a determinare sulla linea pericolose sovratensioni. Per tale motivo la condizione di sovrarifasamento è espressamente vietata dagli enti elettrici.

5. CENNI IMPIANTISTICI

5.1. Caratteristiche dei condensatori industriali

Per la costruzione di banchi di rifasamento si fa ricorso ad appositi condensatori industriali, adatti a tollerare alte tensioni ed alte correnti in condizioni di sicurezza (la normativa di riferimento è costituita dalle norme IEC 831 1/2 e dalle corrispondenti EN 60831 1/2).

Possiamo individuare i seguenti parametri caratteristici:

Tensione nominale

É il massimo valore efficace della tensione alternata sinusoidale applicabile al condensatore.

I condensatori sono ovviamente costruiti per sopportare sovratensioni, la cui entità è fissata dalla normativa in relazione alla durata di applicazione:

- +10% per 8 ore su 24 ore
- +15% per 30 minuti su 24 ore
- + 20% per 5 minuti
- + 30% per 1 minuto.

Si prevedono inoltre delle specifiche di utilizzo in tensione dei condensatori (ad esempio, sovratensioni maggiori del 15% non si devono verificare più di 200 volte nella vita del condensatore).

Frequenza nominale

Frequenza della tensione sinusoidale di alimentazione.

Potenza nominale

É la potenza reattiva erogata dal condensatore alle condizioni nominali di tensione e frequenza.

Capacità nominale

É il valore di capacità che permette di erogare la potenza nominale alle condizioni nominali di tensione e frequenza.

Dal punto di vista costruttivo risulta difficile raggiungere basse tolleranze di capacità. Un tipico intervallo di tolleranza è [-5% .. +10%].

Tensione e potenza di esercizio

Nel caso di frequenti sovratensioni, è necessario sovradimensionare in tensione il condensatore, tenendo presente che la potenza reattiva erogata alla tensione nominale sarà più bassa in ragione del rapporto del quadrato delle tensioni.

$$Q_n = \frac{V_n^2}{X_C} \text{ da cui } X_C = \frac{V_n^2}{Q_n} \quad \text{perciò} \quad Q_{resa} = \frac{V_{esercizio}^2}{X_C} = \frac{V_{esercizio}^2}{V_n^2} Q_n$$

Corrente nominale

É il valore efficace della corrente che circola nel condensatore di capacità nominale alle condizioni nominali di tensione e frequenza.

Corrente massima

Secondo le norme, un condensatore deve essere progettato per tollerare una sovracorrente permanente del 30% a tensione e frequenza nominali. Le sovracorrenti di questo tipo sono normalmente effetto di sovratensioni, armoniche o tolleranze di capacità. Per limitare le sovracorrenti armoniche si utilizzano spesso delle reattanze di blocco (si veda il paragrafo relativo al rifasamento filtrato).

Sono tollerate inoltre elevate correnti di picco, ad esempio 100 o 200 volte la corrente nominale (si verificano tipicamente all'inserzione, specialmente quando un banco viene inserito in parallelo ad un altro banco già energizzato).

Temperatura di esercizio

Insieme alla tensione è il parametro che ha l'influenza maggiore sulla vita del condensatore (indicativamente intorno alle decine fino al centinaio di migliaia di ore di funzionamento). I condensatori sono progettati per funzionare in un preciso intervallo di temperatura (es. [-25 °C .. +50 °C]).

Tensione residua

È la tensione che permane ai capi del condensatore dopo la disinserzione dalla rete. Tale tensione deve essere estinta per evitare condizioni di pericolo per gli operatori

5.2. Struttura di principio dei banchi di rifasamento

I produttori di condensatori mantengono a catalogo condensatori di taglie standard, con potenze che vanno da qualche kVAR a qualche decina di kVAR. Per ottenere la potenza reattiva desiderata, è quindi necessario comporre i condensatori di normale produzione in opportuni banchi.

I banchi di rifasamento sono normalmente costituiti da varie batterie di condensatori collegate in parallelo, all'interno delle quali i condensatori sono fra loro collegati in serie.

Il numero di condensatori da collegare in serie in ciascuna batteria viene scelto in base alla tensione di lavoro nominale del banco, considerando un eventuale sovradimensionamento in tensione di ciascun condensatore. La capacità della singola batteria è data dalla serie delle singole capacità:

$$C_s = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots}$$

Per ottenere la capacità totale dell'intero banco, si devono quindi accostare in parallelo un adeguato numero di batterie di condensatori (considerando che nel collegamento in parallelo, il valore della capacità si somma).

La presenza di eventuali induttanze di blocco richiede un aumento della potenza del banco, per compensare la potenza reattiva induttiva introdotta dai reattori.

5.3. Resistenze di scarica

Alla disinserzione, i condensatori mantengono la loro tensione di lavoro. Per la sicurezza degli operatori, è necessario estinguere tale tensione.

Qualora il carico stesso non possa essere sfruttato per dissipare l'energia accumulata nei condensatori, si utilizzano delle opportune resistenze di scarica poste in parallelo ai condensatori (e spesso inserite dal costruttore direttamente nell'involucro).

Per il dimensionamento delle resistenze di scarica, è necessario considerare l'andamento temporale del fenomeno di scarica. Consideriamo un condensatore di capacità C , con una resistenza R collegata in parallelo. Se al condensatore si applica una tensione sinusoidale di valore efficace V_n , il valore massimo della tensione presente sul condensatore vale $\sqrt{2} V_n$. Alla disinserzione, il condensatore si scarica sulla resistenza con legge esponenziale decrescente. Supponiamo di voler ottenere una tensione v_0 dopo un tempo t_0 . Vale la seguente relazione

$$v_0 = v(t_0) = \sqrt{2} \cdot V_n e^{-\frac{t_0}{RC}}$$

da cui
$$R = \frac{t_0}{C \cdot \ln \frac{\sqrt{2} V_n}{v_0}}$$

Esempio

Si calcoli la dissipazione di una resistenza di scarica in funzione della potenza reattiva di un banco di rifasamento trifase (collegamento a triangolo) con tensione nominale $V_n=400V$.

La norma CEI 33-1 impone che dopo un minuto la tensione non superi i 50 V. Quindi

$$V_n = 400V, \quad t_0 = 60 \text{ s}, \quad v_0 = 50 \text{ V}$$

Si ottiene
$$R = \frac{24.7}{C}$$

Ricordando che per il collegamento a triangolo vale la relazione

$$Q_n = 3 \cdot V^2 \cdot \omega C \quad \text{da cui} \quad C = \frac{Q_n}{3 \omega V^2}$$

si perviene a

$$R = \frac{24.7 \cdot 3 \omega V^2}{Q_n} = \frac{3.7 \cdot 10^9}{Q_n}$$

Ma ricordando l'espressione della potenza dissipata su una resistenza (caso trifase con collegamento a triangolo), si calcola infine

$$P_R = 3 \cdot \frac{V^2}{R} = 1.3 \cdot 10^{-4} Q_n$$

Ovvero, la potenza dissipata sulle resistenze di scarica è numericamente di circa 4 ordini di grandezza inferiore alla potenza del banco di rifasamento.

6. RIFASAMENTO DI CARICHI VARIABILI

Negli impianti industriali i carichi da sottoporre a rifasamento sono solitamente variabili. Normalmente gli impianti di rifasamento servono un elevato numero di utenze che hanno regimi di lavoro differenziati. Tuttavia anche un carico singolo può essere intrinsecamente variabile, ad esempio un motore che lavora a regimi diversi o, all'estremo, un forno elettrico siderurgico che passa in frazioni di secondo dal corto circuito al circuito aperto. Si pone quindi il problema di adeguare il rifasamento alla variabilità del carico, per ottenere un $\cos\varphi$ che vari all'interno di un intervallo prestabilito.

6.1. Rifasamento medio

Il modo più semplice di rifasare carichi variabili è di dimensionare il rifasamento per l'assorbimento medio di potenza reattiva. Ovviamente, questa soluzione è praticabile nel caso di carichi non soggetti a grandi variazioni e comunque con andamenti sostanzialmente prevedibili.

Si supponga che di osservare un impianto nell'intervallo di tempo Δt , frazionabile negli intervalli t_1, t_2, \dots, t_n . In ciascuno degli intervalli l'impianto assorba le potenze attive P_1, P_2, \dots, P_n e le potenze reattive Q_1, Q_2, \dots, Q_n . Le energie attive e reattive complessivamente messe in gioco sono così valutabili

$$E_p = P_1 \cdot t_1 + P_2 \cdot t_2 + \dots + P_n \cdot t_n$$

$$E_Q = Q_1 \cdot t_1 + Q_2 \cdot t_2 + \dots + Q_n \cdot t_n$$

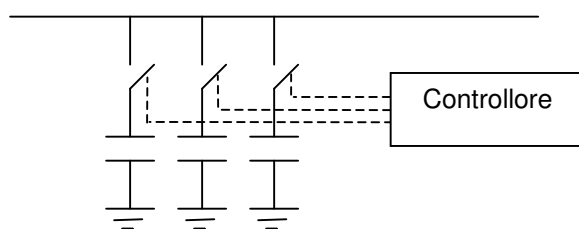
L'angolo di sfasamento medio è ottenibile direttamente dalle energie attive e reattive:

$$\varphi_m = \arctg \frac{E_Q}{E_p}$$

Il rifasamento verrà quindi dimensionato rispetto a $\cos\varphi_m$.

6.2. Inserzione controllata di banchi di condensatori

Nel caso di carichi variabili in modo imprevedibile o soggetti a variazioni significative, si preferisce adottare una soluzione diversa. Il banco di rifasamento viene frazionato in banchi parziali, il cui inserimento è controllato da interruttori. Un opportuno sistema di controllo verifica in modo continuo il $\cos\varphi$ dell'impianto e provvede ad inserire o disinserire i banchi parziali in relazione agli assorbimenti, in modo da mantenere il $\cos\varphi$ complessivo entro i limiti richiesti.



rifasamento frazionato

Il banco complessivo può essere suddiviso in vario modo. La suddivisione in banchi uguali consente di assegnare ciclicamente l'ordine di inserimento dei banchi per distribuire uniformemente l'usura. La suddivisione in banchi proporzionali alle potenze di 2 (1, 2, 4, 8, ...) consente invece di ottenere un elevato numero di gradini di capacità e quindi un controllo più fine della potenza reattiva.

La soluzione di inserzione controllata di banchi parziali presenta alcuni inconvenienti, dovuti principalmente alle difficoltà di gestione dei banchi di condensatori.

Infatti i condensatori devono essere scaricati fino ad una tensione residua del 10% prima di essere nuovamente energizzati: è quindi necessario attendere il tempo di scarica. Normalmente i controllori introducono un ritardo prefissato alla reinserzione (selezionabile dall'operatore).

Inoltre l'inserzione di un singolo banco determina una sovracorrente notevole tra un banco e l'altro (la corrente non è limitata dalle induttanze della linea), con conseguente maggiore usura e possibile danneggiamento dei dispositivi di interruzione. È quindi necessario introdurre dei reattori di blocco posti in serie al banco. Le reattanze di blocco devono essere piccole rispetto alla reattanza capacitiva, ma sufficienti a mantenere la corrente di inserzione al di sotto del valore desiderato.

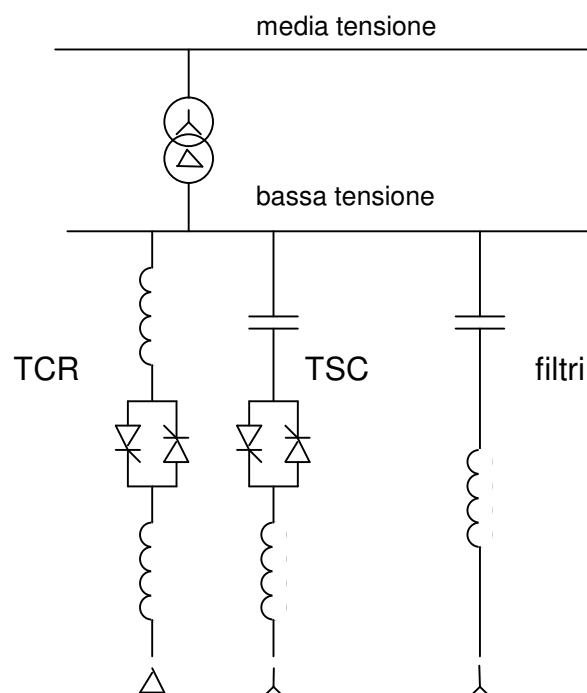
6.3. Compensatori statici

L'utilizzo di componenti elettronici di potenza (tipicamente tiristori) ha permesso la costruzione di dispositivi, denominati SVC (Static Var Compensator) in cui il controllo elettronico permette una regolazione rapida e pressoché continua della potenza reattiva.

In linea di principio un SVC è costituito da un banco di condensatori collegato in parallelo a un reattore controllato a tiristori (TCR: Thyristor Controlled Reactor). Il banco di condensatori può eventualmente essere composto da alcuni banchi fissi, normalmente filtrati (si veda il paragrafo 7), e da alcuni banchi inseribili per mezzo di un comando a tiristori (SVC: Thyristor Switched Capacitor). Si perviene quindi alla struttura generale indicata in figura.

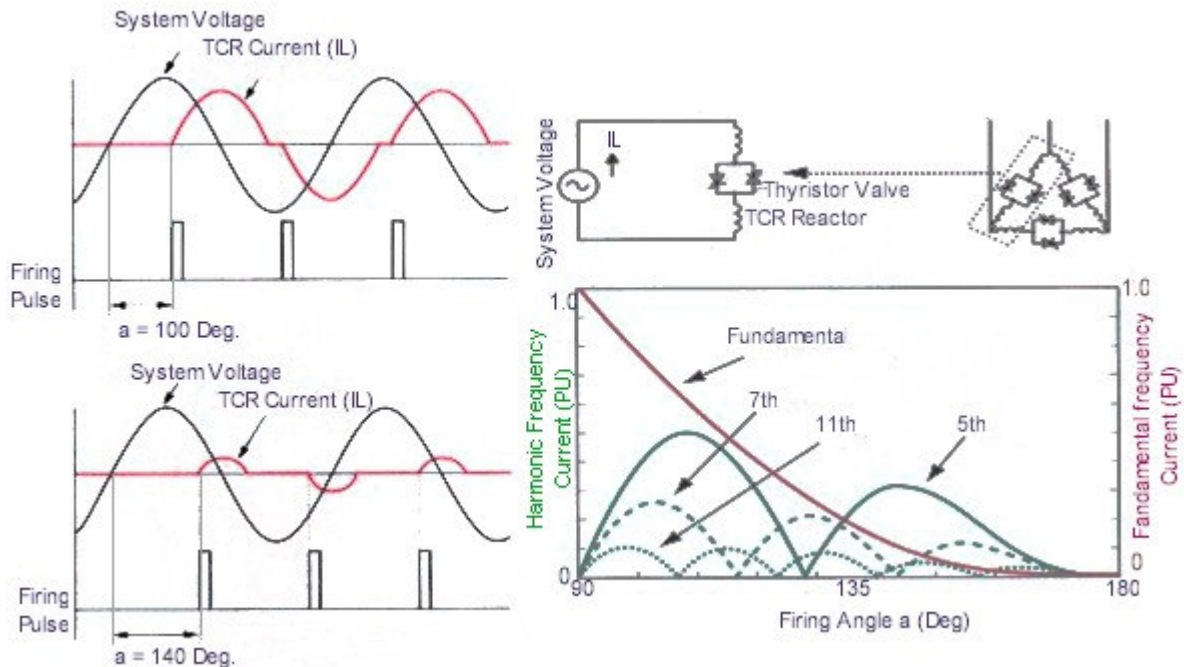
Nel gruppo TCR la corrente che percorre gli induttori è parzializzata in modo continuo dai tiristori (mediante la variazione dell'angolo di accensione tra i 90° e i 180° teorici). La potenza reattiva induttiva, variabile tra 0 e un valore massimo, va a compensare la potenza reattiva capacitiva del banco dei compensatori, eventualmente annullandola nel caso di massimo inserimento degli induttori. Si ottiene quindi una variazione continua della potenza reattiva, controllabile da un opportuno sistema di controllo in funzione dell'assorbimento di potenza reattiva del carico.

Il tempo di intervento dei tiristori è all'incirca pari al tempo di ciclo della tensione di rete (20 ms a 50 Hz). Tale caratteristica rende i sistemi SVC adatti al rifasamento di carichi estremamente



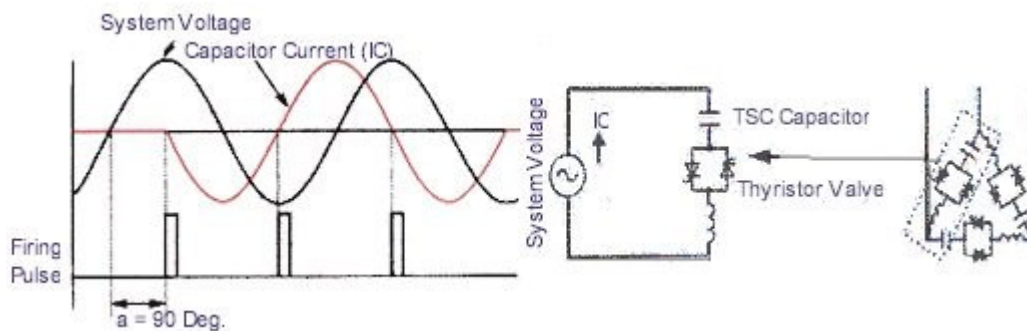
variabili (ad esempio, forni siderurgici ad arco).

Le armoniche di corrente generate dai tiristori devono essere filtrate da opportuni banchi filtro.



Correnti reattive assorbite da un TCR e generazione armonica (fonte: Thosiba Corp.)

Nei gruppi TSC i banchi parziali di condensatori vengono inseriti/disinseriti per mezzo di un comando a tiristori. Si tratta di una variante del sistema ad inserimento elettromeccanico, con caratteristiche migliori di velocità e controllo.



Correnti reattive assorbite da un TSC (fonte: Thosiba Corp.)

Gli SVC hanno l'importante effetto di stabilizzare la tensione sul carico. Per questo motivo vengono usati nella stabilizzazione di tensione delle grandi linee di distribuzione.

7. RIFASAMENTO FILTRATO

La presenza di carichi non lineari determina la generazione di distorsione armonica di tensione e corrente.

Questo fenomeno è potenzialmente pericoloso per un impianto di rifasamento, in quanto la capacità di rifasamento forma con l'induttanza della linea un circuito risonante parallelo, che, in condizioni di risonanza, amplifica notevolmente l'effetto delle correnti armoniche. In figura è rappresentata la generazione armonica del carico (generatore di corrente I_H) che si chiude sul parallelo della reattanza capacitiva del rifasamento X_C e della reattanza induttiva della linea X_L . La condizione

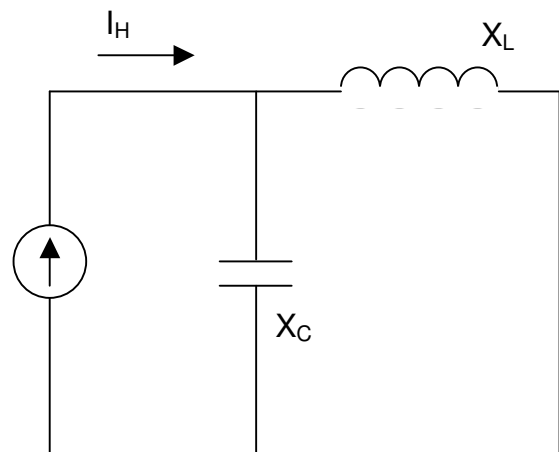
di risonanza è data da $\omega_n = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}}$, con ω_n

pulsazione della corrente armonica

Una prima soluzione a questo problema è l'interposizione in serie alla capacità di una opportuna induttanza (induttanza di sbarramento) che sposti la frequenza di risonanza del circuito al disotto della più bassa armonica presente nel circuito (si parla in questo caso di "detuned filter"). La reattanza dell'induttanza di blocco diminuisce la reattanza capacitiva complessiva del rifasamento; essa va quindi considerata nel dimensionamento dei banchi dei condensatori.

Una soluzione migliore è costituita dalla configurazione del banco di rifasamento in forma di batteria di filtri, mediante l'inserimento di opportuni reattori in serie alle capacità del banco. I filtri vengono accordati sulle armoniche più basse generate dal carico. Generalmente però non si persegue un accordo perfetto, per evitare valori troppo bassi di impedenza alle armoniche di riferimento. Valori tipici di accordo di filtri 145 Hz ($X_L = 13\% X_C$), 190 Hz ($X_L = 7.5\% X_C$), 210 Hz ($X_L = 6\% X_C$) (fonte: Ducati Energia).

Si noti che la presenza dell'induttore in serie alla capacità del banco richiede il sovradimensionamento in tensione del banco dei condensatori rispetto alla tensione nominale. Per quanto riguarda il sovradimensionamento in corrente, è necessario verificare l'effettiva generazione armonica del carico alle varie frequenze di accordo.



Generazione armonica del carico

