

RIFASAMENTO ELETTRICO

A cura del prof: Ing. Fusco Ferdinando

Indice

- STUDIO TEORICO pag. 3
- PROVA SIMULATA pag.18
- PROVA PRATICA IN LABORATORIO pag.23
- RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI pag.26

STUDIO TEORICO

Introduzione

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 (A) 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 il coseno dell'angolo di 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 la si può ottenere inserendo nell'impianto delle batterie di condensatori e operando il cosiddetto rifasamento. Due sono i vantaggi che fundamentalmente possono derivare dal rifasamento:

1. mancata penale che l'ente distributore solitamente pratica a chi utilizza energia elettrica con un fattore di potenza medio mensile inferiore a 0,9;
2. 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 cioè trasformatori di potenza minore, conduttori di sezione più piccola, 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, non utilizzando motori e trasformatori senza carico ed evitando di tenere in funzione motori difettosi.

Richiami 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:

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

con

$$I_a = I \cos\varphi$$

$$I_L = I \sin\varphi$$

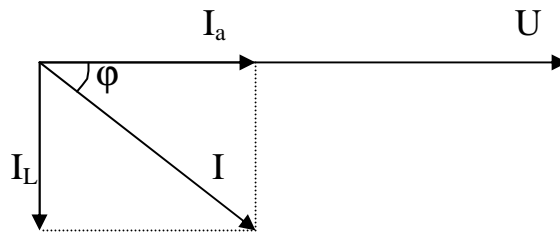


Diagramma vettoriale della corrente in un circuito ohmico-induttivo

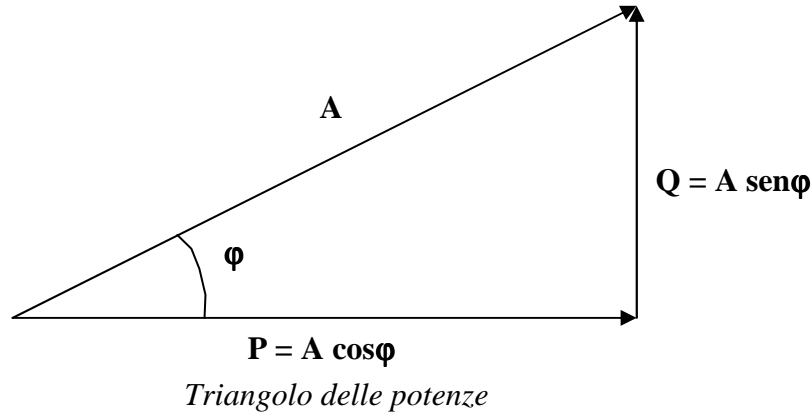
Dalla teoria le relazioni esistenti tra tensione, corrente, angolo di fase e potenze danno:

Circuito monofase	
Potenza attiva	$P = U I \cos\varphi$
Potenza reattiva	$Q = U I \sin\varphi$
Potenza apparente	$A = U I$

Circuito Trifase	
Potenza attiva	$P = \sqrt{3} U_c I \cos\varphi$
Potenza reattiva	$Q = \sqrt{3} U_c I \sin\varphi$
Potenza apparente	$A = \sqrt{3} U_c I$

con U_c tensione concatenata.

Tali relazioni sono rappresentabili mediante il cosiddetto triangolo delle potenze



da cui è possibile ricavare le seguenti espressioni :

$$Q = P \operatorname{tg} \varphi$$

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

Per fornire una potenza attiva P (nel caso trifase) ad una determinata tensione concatenata U_c , occorre una corrente pari a:

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

La corrente è inversamente proporzionale al $\cos \varphi$ e quindi per ridurre tale corrente al valore più basso possibile si deve tendere a un $\cos \varphi = 1$.

Dipendenza dal $\cos \varphi$ della caduta di tensione e della perdita di potenza lungo una linea

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 I 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 la necessaria componente attiva della corrente I , risulta tanto maggiore quanto maggiore è la corrente reattiva richiesta dai carichi e impone un sovradimensionamento della sezione dei cavi. Infatti, volendo contenere *la perdita e la caduta di tensione* lungo la linea attraversata dalla corrente I , bisogna contenere la corrente reattiva I_L .

Le espressioni, nel caso di sistema trifase, della P_j e della ΔU_c sono:

$$P_j = 3 R_L I^2$$

$$\Delta U_c = \sqrt{3} (R_L I \cos\varphi + X_L I \sin\varphi)$$

con R_L e X_L resistenza e reattanza della linea.

Moltiplicando e dividendo la ΔU_c per U_c si ottiene:

$$\Delta U_c = \frac{\sqrt{3} (R_L I \cos\varphi + X_L I \sin\varphi) U_c}{U_c}$$

Ricordando le espressioni della P e della Q la relazione vista si trasforma in:

$$\Delta U_c = \frac{P R_L + Q X_L}{U_c}$$

A parità di potenza attiva P , la caduta di tensione diminuirà se la potenza reattiva assorbita Q diminuirà anch'essa.

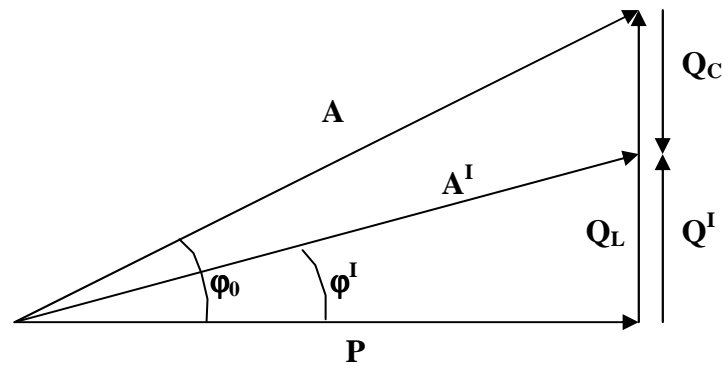
Per contenere la caduta di tensione entro il limite del 5% si dovrà sovradimensionare la sezione dei conduttori con un aumento del costo complessivo dell'impianto. Inoltre, l'energia reattiva assorbita ha un suo costo; infatti, quando supera il 50% dell'energia attiva assorbita, l'ente fornitore di energia elettrica applica una tariffazione anche all'energia reattiva assorbita.

Scelta della batteria di condensatori

Oltre ai carichi induttivi di cui sopra esiste un'altra categoria di carichi cosiddetti capacitivi: condensatori e compensatori sincroni. Anche questi carichi assorbono potenza reattiva ma, in questo caso la corrente assorbita è sfasata in anticipo di 90° sulla tensione. 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. La relazione della potenza reattiva assorbita da un carico capacitivo è in modulo la stessa di un carico induttivo e l'unica differenza sta nel segno che risulta negativo.

Il triangolo delle potenze si presenta quindi in questo modo:



Triangolo delle potenze per carico ohmico-induttivo + condensatore

Con:

- angolo iniziale, φ^I nuovo angolo dovuto alla presenza del condensatore,
- A potenza apparente iniziale, A^I potenza apparente assorbita dopo l'inserimento del condensatore;
- P potenza attiva assorbita che deve restare costante;
- Q_C Potenza reattiva assorbita dal condensatore.
- Q_L potenza reattiva induttiva assorbita dal carico ohmico-induttivo;
- Q^I potenza reattiva richiesta dal complesso: carico ohmico-induttivo e condensatore di rifasamento.

E' possibile sfruttare il fenomeno della diminuzione della Q introducendo nell'impianto dei carichi capacitivi e 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.

Dal triangolo delle potenze visto prima, per passare da un angolo φ ad un angolo φ^1 si deve assorbire una potenza reattiva capacitiva

$$Q_C = Q_L - Q^I$$

ma

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

$$Q^I = P \operatorname{tg}\varphi^1$$

quindi la Q_C diventa

$$Q_C = P (\operatorname{tg}\varphi_0 - \operatorname{tg}\varphi^1)$$

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 $\cos\varphi$. 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 $\cos\varphi$ 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.

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 un sistema monofase, con U_f tensione di fase, la capacità si ricava dalla relazione:

$$C = \frac{Q_c}{2 \pi f U_f^2}$$

Per sistema trifase bisogna differenziare tra collegamento a stella o a triangolo.

Per collegamento a stella:

$$C_Y = \frac{Q_c}{2 \pi f U_f^2} = \frac{3 Q_c}{2 \pi f U_c^2}$$

In quanto la

$$U_f = \frac{U_c}{\sqrt{3}}$$

Per collegamento a triangolo:

$$C_{\Delta} = \frac{Q_c}{2 \pi f U_c^2}$$

Da quanto visto, si deduce che, a parità di potenza reattiva Q_c la connessione a stella richiede capacità 3 volte maggiori rispetto al collegamento a triangolo e i condensatori saranno sottoposti alla tensione di fase. A parità di capacità invece se il collegamento è a stella la potenza reattiva fornita è tre volte minore.

Criteri di scelta del collegamento

Nel caso delle batterie trifasi, il tipo di collegamento fra condensatori viene scelto tenendo presente che il collegamento a triangolo consente di utilizzare condensatori di capacità pari a un terzo rispetto a quello a stella, ma che devono essere isolati per la tensione concatenata, mentre quelli a stella sono isolati per la tensione di fase, pari a $U_c/\sqrt{3}$.

Nel caso del rifasamento di sistemi di categoria I, essendo bassa la tensione, risceglie il collegamento a triangolo per la riduzione di capacità che offre; per esempio nel caso di sistemi a 400 volt, tra un isolamento previsto per 400 V o per $400/\sqrt{3} = 230V$ non vi è praticamente alcuna differenza.

Nel caso di rifasamento di sistemi di II e III categoria la differenza di isolamento diventa importante e si preferisce il collegamento a stella.

Metodi di rifasamento

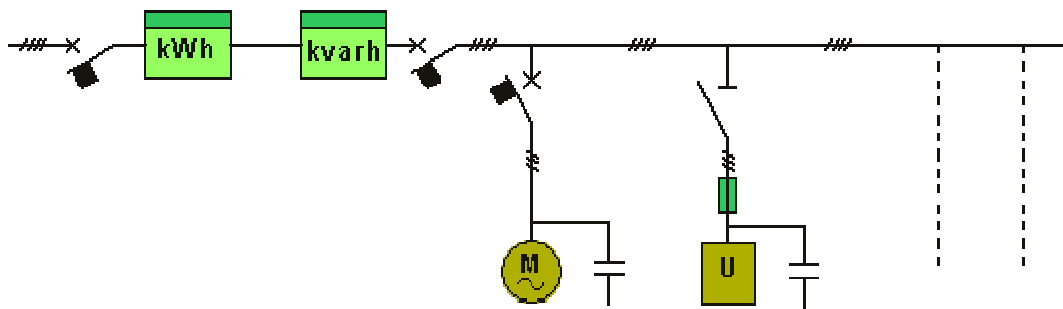
La scelta del tipo di impianto di rifasamento va fatta in base a una serie di considerazioni di carattere tecnico-economico. In primo luogo, nel caso di impianti con fattore di potenza medio mensile inferiore a 0,9, si deve valutare la convenienza economica del rifasamento, tenendo conto sia del costo dell'energia reattiva sia del costo e del periodo di ammortamento dell'impianto da rifante. Successivamente occorre scegliere la soluzione da adottare, tenendo conto dei seguenti fattori:

- apparecchi utilizzatori alimentati;

- potenze dei singoli utilizzatori;
- loro distribuzione;
- curve di carico dei vari utilizzatori;
- confronto economico tra le varie soluzioni.

Rifasamento distribuito

Si realizza installando una batteria di condensatori di adeguata potenza in parallelo a ogni utilizzatore, comandata in genere dallo stesso apparecchio di manovra.



Rifasamento distribuito

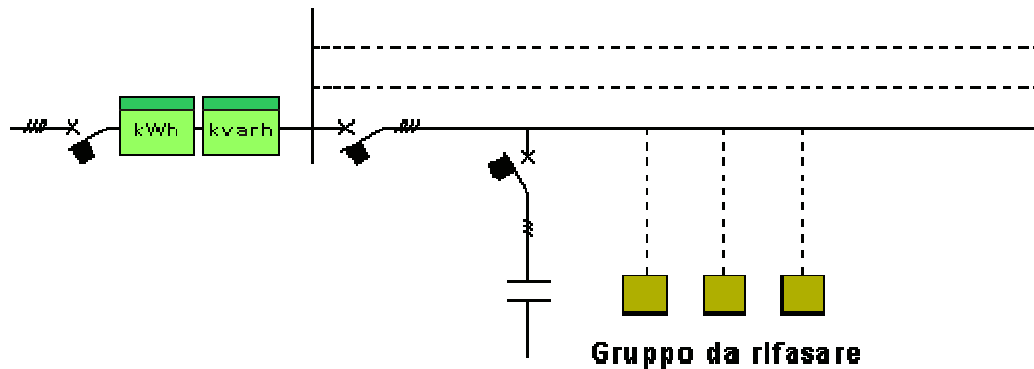
Questa soluzione risulta conveniente quando si devono rifasare pochi utilizzatori di notevole potenza, altrimenti diventa antieconomica perché fraziona la potenza rifasante totale fra troppe batterie di piccola potenza. Infatti, il costo per unità di potenza reattiva dei condensatori aumenta al diminuire della potenza. Il costo non viene compensato se gli utilizzatori lavorano per poche ore al giorno.

Tecnicamente è la soluzione migliore perché comporta i seguenti vantaggi:

- si adegua automaticamente la potenza rifasante al numero di utilizzatori in funzione.
- La riduzione della corrente assorbita dalla linea, conseguente al rifasamento, interessa tutta la linea, fino alla derivazione del condensatore (che conviene sia installato direttamente sui morsetti dell'utilizzatore) portando ad un risparmio sulla sezione dei cavi.

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, dotata di propri apparecchi di manovra e protezione.



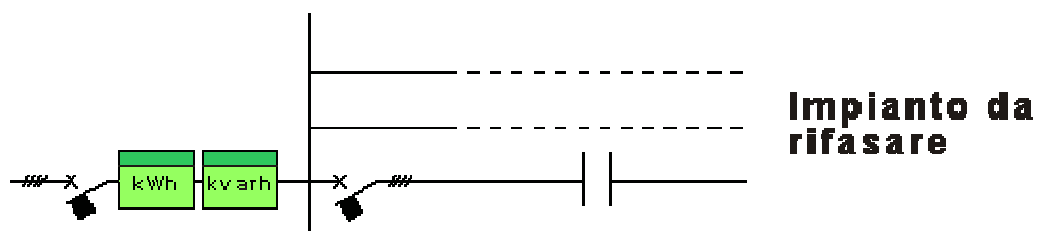
Rifasamento per gruppi

Per il calcolo della batteria occorre valutare la potenza mediamente assorbita e il fattore di potenza medio del gruppo.

Per quanto riguarda i cavi è da tener presente che non c'è alcuna riduzione di sezione per tutta la rete di distribuzione a valle del punto di collegamento del condensatore.

Rifasamento centralizzato

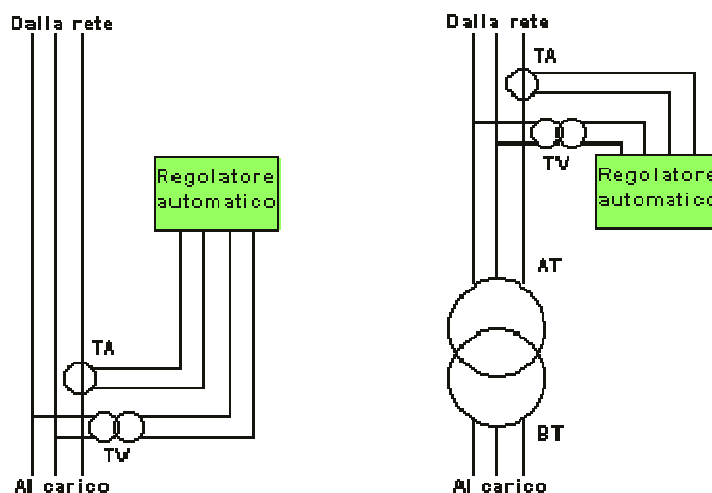
E' il metodo in assoluto più economico e consiste nell'installare un'unica batteria di condensatori a monte di tutto l'impianto. Può essere considerato l'opposto del rifasamento distribuito in quanto non determina uno sfruttamento ottimale dell'impianto. E' senz'altro il sistema migliore se installato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



Rifasamento centralizzato

Rifasamento centralizzato a potenza modulabile

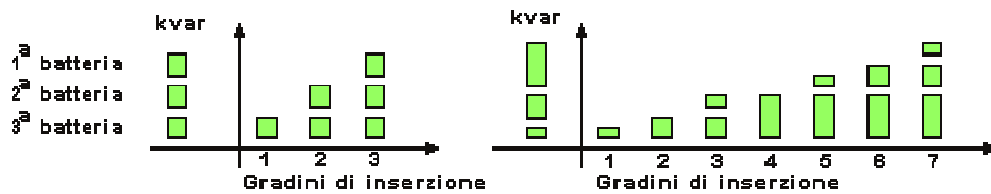
Negli impianti in cui invece le condizioni di carico sono piuttosto variabili (si ricorda il divieto di abbassare il fattore di potenza al di sotto del valore 0,7 e la convenienza di mantenerlo al di sopra di 0,9 con potenze impegnate superiori a 15 kW, per evitare sovrapprezzi) vengono impiegati sistemi di rifasamento automatici che, per mezzo di un sistema di rilevamento di tipo varmetrico, permettono l'inserzione o la disinserzione automatica di diverse batterie di condensatori, seguendo in tal modo le variazioni della potenza reattiva assorbita mantenendo costante il fattore di potenza dell'impianto. Nello schema logico che segue è rappresentato il principio operativo dei quadri di rifasamento automatico.



Schema di inserzione di un regolatore automatico

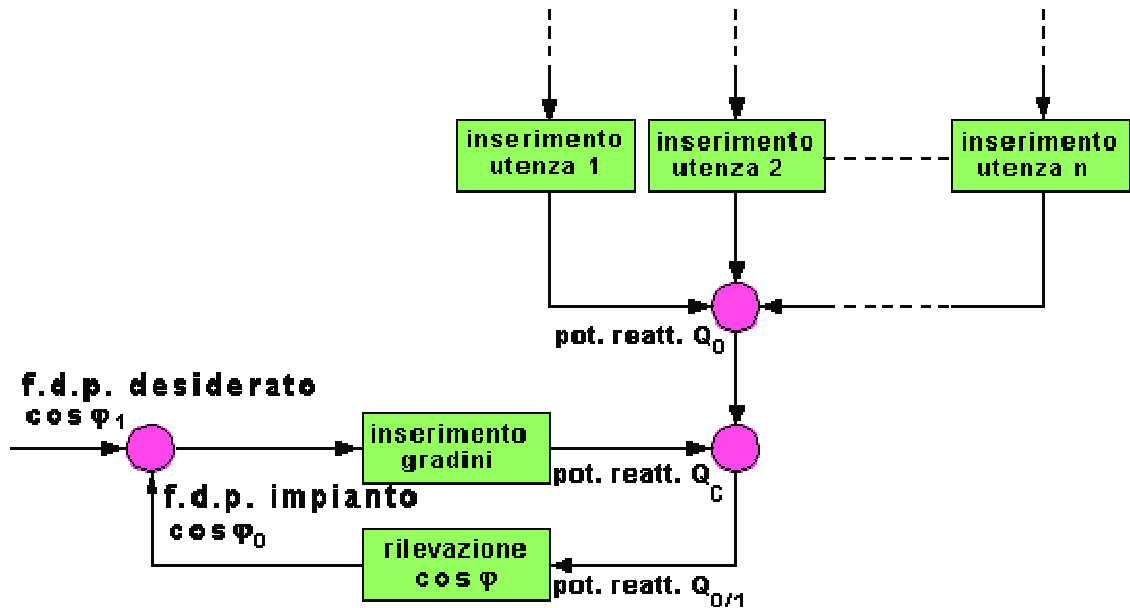
Un opportuno dispositivo (relè di regolazione) confronta il valore desiderato del fattore di potenza a quelli effettivamente assunti dall'impianto durante l'esercizio. In base allo scostamento rilevato comanda l'inserimento o il disinserimento, attraverso opportuni contattori, dei gruppi di condensatori 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.

Per consentire un funzionamento senza pendolamenti (inserzione e disinserzione 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.



Frazionamento delle batterie di condensatori

La potenza complessiva viene frazionata in un certo numero di batterie uguali oppure con potenza che segue la proporzione 1,2,4,8,... 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.



Schema logico di funzionamento dei quadri di rifasamento automatici

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.

Rifasamento misto

In molti casi pratici si può ricorrere a uno schema di rifasamento misto, intendendo con questo termine una soluzione che utilizzi tutti o parte degli schemi precedentemente descritti.

Dispositivi di protezione e comando

All'atto dell'inserzione dei condensatori possono verificarsi correnti di valore maggiore della nominale. La corrente di inserzione I_{sc} dipende dal tipo e dalla capacità del condensatore singolo o in batteria 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); devono consentire l'assorbimento di lievi sovraccarichi dovuti a sovratensioni transitorie.

In genere questo si ottiene scegliendo l'interruttore automatico con:

1. una corrente nominale e una soglia magnetica tali da evitare scatti intempestivi della protezione termica e da permettere la messa in tensione del condensatore (si può ammettere, con un buon margine di sicurezza, che non si ha l'intervento dell'interruttore se la corrente di spunto del condensatore non supera la soglia di intervento magnetico);
2. potere d'interruzione non inferiore alla corrente di corto circuito presunta nel punto di installazione del condensatore.

Oltre a questo è necessario attuare la protezione contro la permanenza di tensione sul condensatore dopo il sezionamento. Questo avviene grazie all'utilizzo di resistenze di scarica poste in parallelo al condensatore tali che, per B.T., entro 1 minuto la tensione passa dal valore massimo a 50V.

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 Inc** (corrente nominale del condensatore) 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.

Per la protezione con interruttore automatico magnetotermico:

$$I_n \geq 1,43 I_{nc}$$

$$I_m \geq I_{sc}$$

I_n e I_m rispettivamente corrente nominale e di sgancio magnetico dell'interruttore.

Esempio di rifasamento a gradini

Da misure effettuate presso una utenza industriale in BT , 380 V , 50 Hz, è stato tracciato un diagramma di carico:

Il valore del fattore di potenza medio mensile misurato è pari a 0,75 e lo si vuole elevare a un valore medio mensile pari a 0,9.

I singoli carichi, che inseriti nell'arco della giornata danno luogo al diagramma di carico, sono riassumibili nel modo seguente:

$P_1 = 20 \text{ kW}$	$\cos\varphi = 0,75$
$P_2 = 30 \text{ kW}$	$\cos\varphi = 0,75$
$P_3 = 50 \text{ kW}$	$\cos\varphi = 0,75$
$P_4 = 120 \text{ kW}$	$\cos\varphi = 0,75$

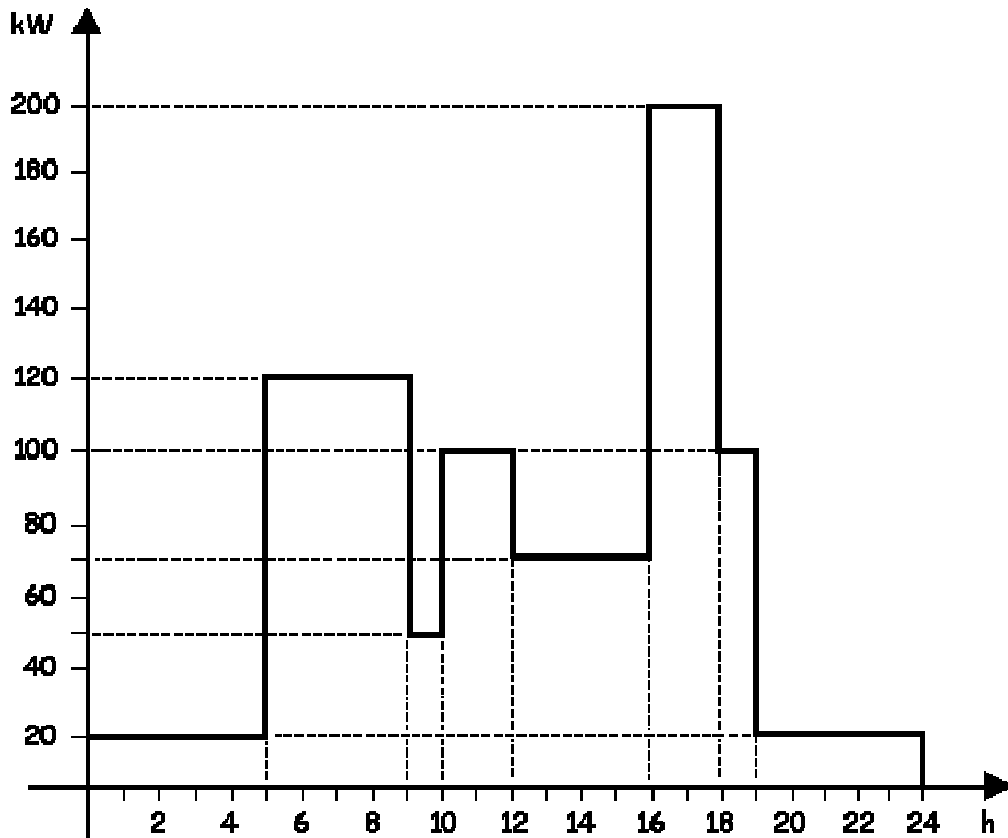


Diagramma di carico giornaliero

Essendo la richiesta di potenza reattiva variabile, si sceglie un impianto di rifasamento centralizzato a potenza modulabile e variazione a gradini.

Dal diagramma di carico precedente è possibile calcolare la potenza rifasante occorrente per ogni intervallo di tempo:

Intervallo	Potenza attiva P	Potenza reattiva Qc
00.00 alle 05.00	$P(0-5) = 20\text{kW}$	$Q_c = 7,96 \text{ kvar} \cong 8 \text{ kvar}$
05.00 alle 09.00	$P(5-9) = 120\text{kW}$	$Q_c = 48,72 \text{ kvar} \cong 50 \text{ kvar}$
09.00 alle 10.00	$P(9-10) = 50\text{kW}$	$Q_c = 19,90 \text{ kvar} \cong 20 \text{ kvar}$
10.00 alle 12.00	$P(10-12) = 100\text{kW}$	$Q_c = 39,80 \text{ kvar} \cong 40 \text{ kvar}$

12.00 alle 16.00	$P(12-16) = 70\text{kW}$	$Q_c = 27,86 \text{ kvar} \cong 30 \text{ kvar}$
16.00 alle 18.00	$P(16-18) = 200\text{kW}$	$Q_c = 79,60 \text{ kvar} \cong 80 \text{ kvar}$
18.00 alle 19.00	$P(16-19) = 100\text{kW}$	$Q_c = 39,80 \text{ kvar} \cong 40 \text{ kvar}$
19.00 alle 24.00	$P(19-24) = 20\text{kW}$	$Q_c = 7,96 \text{ kvar} \cong 10 \text{ kvar}$

Dalle tabelle riportate nei libri di testo si possono scegliere i moduli di singola potenza con valori di 10 – 20 – 20 – 30 kvar e quindi con una potenza reattiva totale del banco pari a 80 kvar. In pratica posso soddisfare a tutte le richieste di potenza reattiva capacitiva richiesta inserendo i moduli in opportune combinazioni a formare la Q_c più idonea per i diversi intervalli di tempo.

PROVA SIMULATA DI RIFASAMENTO SU CARICO

OHMICO - INDUTTIVO

Con la prova simulata in aula informatica si raggiunge lo scopo di provare un circuito visualizzando le variazioni della corrente (in termini di ampiezza e di fase) e di ottenere dei risultati che confermano il modello matematico adottato e sviluppato durante la lezione teorica.

Invece, affidandosi alla sola prova pratica in laboratorio, gli eventuali errori che possono verificarsi in tale prova dovuti a collegamenti errati, errori nell'uso degli strumenti di misura, o anche componenti difettosi, potrebbero portare gli alunni a trarre conclusioni errate sulla validità di quanto hanno appreso.

PROVA SIMULATA: Rifasamento di un carico ohmico-induttivo

Dato il carico ohmico-induttivo trifase con le seguenti caratteristiche:

$$U_n = 380V;$$

$$P = 150kW;$$

$$\cos\varphi = 0.5;$$

la prova simulata prevede:

1. Calcolo delle capacità da inserire (con collegamento a triangolo) in parallelo al carico per poterlo rifasare a 0,9.
2. Calcolo delle capacità da inserire (con collegamento a triangolo) in parallelo al carico per poterlo rifasare a 1.
3. Visualizzazione della forma d'onda della corrente e della tensione, rilevazione del valore di picco della corrente e calcolo del valore efficace sia prima che dopo l'inserzione delle due batterie di condensatori.
4. Considerazioni sui risultati ottenuti.

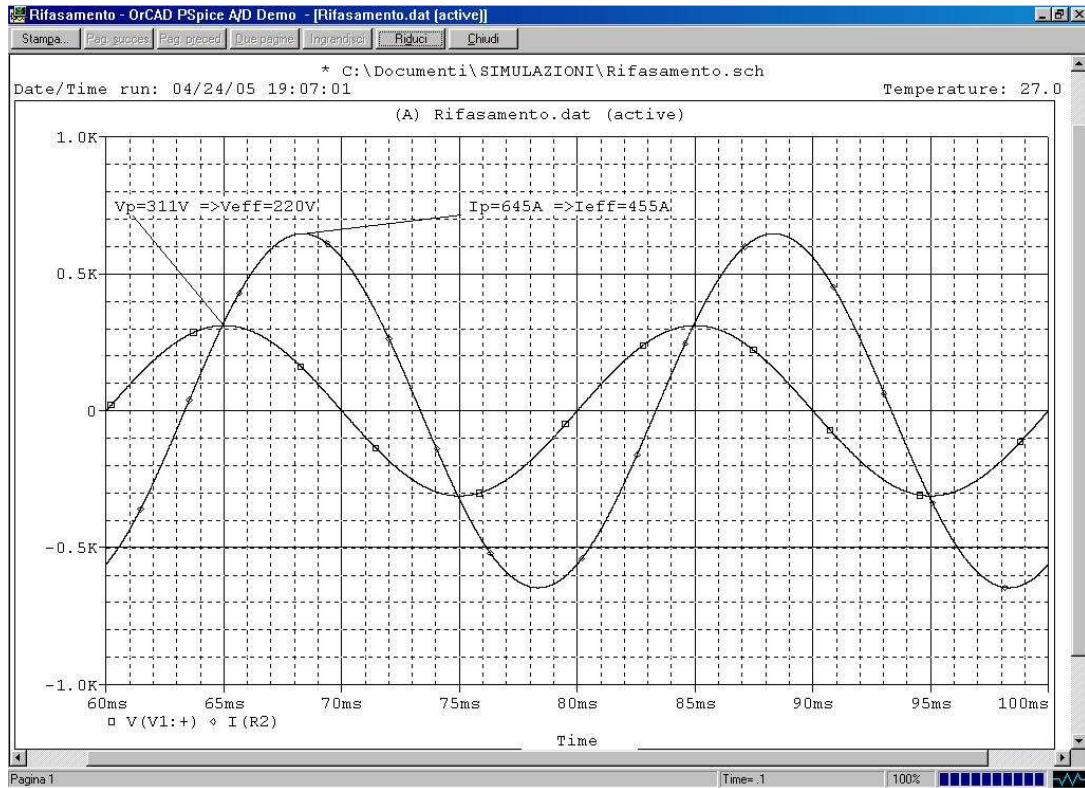
Per effettuare la simulazione la rete trifase viene simulata con tre generatori di tensione $V_f = 220V$ e collegati a stella.

Invece, il carico trifase con le caratteristiche descritte precedentemente può essere simulato considerando per ogni fase una serie R-L con i seguenti valori:

$$R = 240,7 \text{ m}\Omega$$

$$L = 1,327 \text{ mH}$$

La simulazione in assenza di rifasamento restituisce le seguenti forme d'onda di tensioni e correnti:



Dal valore di picco della corrente $I_p = 645A$ si calcola il valore efficace che risulta $I_{eff} = 455A$.

Calcolando la potenza attiva ssorbita con il prodotto $R \cdot I_{eff} = 150 \text{ kW}$ che convalida i dati iniziali sul carico e calcolando la potenza apparente $A = \sqrt{3} U_c \cdot I_{eff}$, dal rapporto di P e A si ottiene il fattore di potenza del carico che come inizialmente previsto vale 0,5.

Utilizzando le formule viste nella lezione teorica

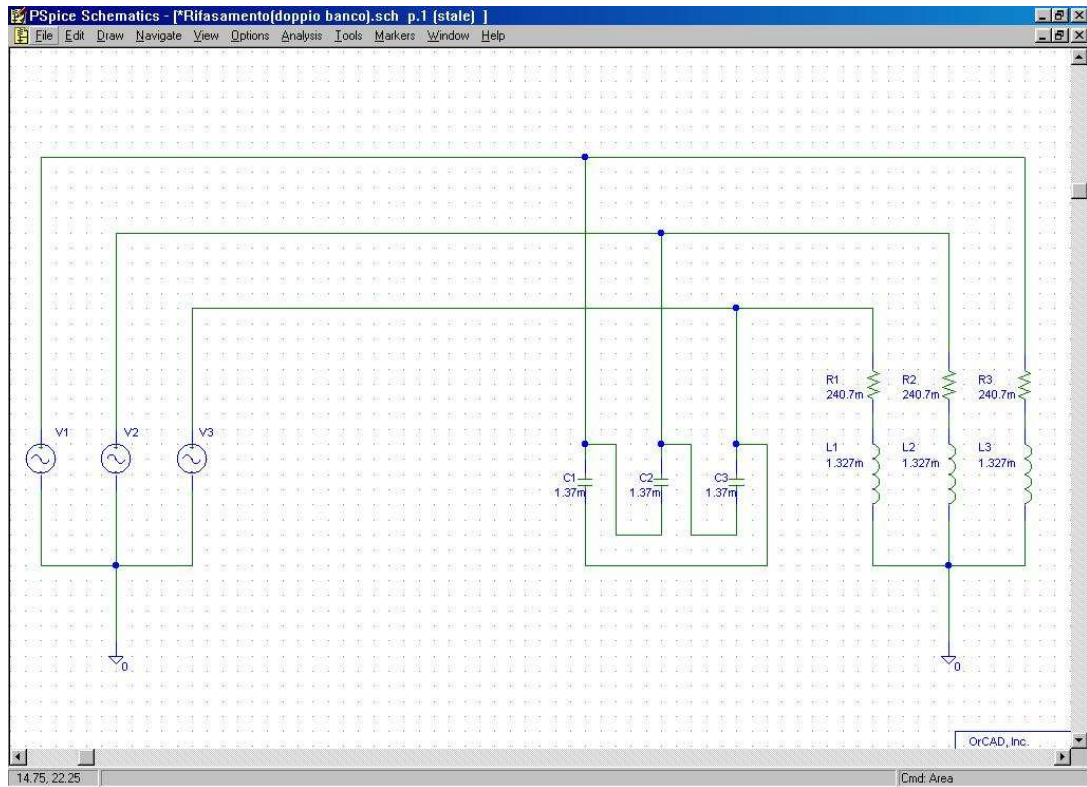
$$Q_c = P (\text{tg}\varphi_0 - \text{tg}\varphi^1)$$

$$C_\Delta = \frac{Q_c}{2 \pi f U_c^2}$$

è possibile calcolare il valore delle capacità da inserire in parallelo al carico per poter portare il fattore di potenza al nuovo valore di 0,9.

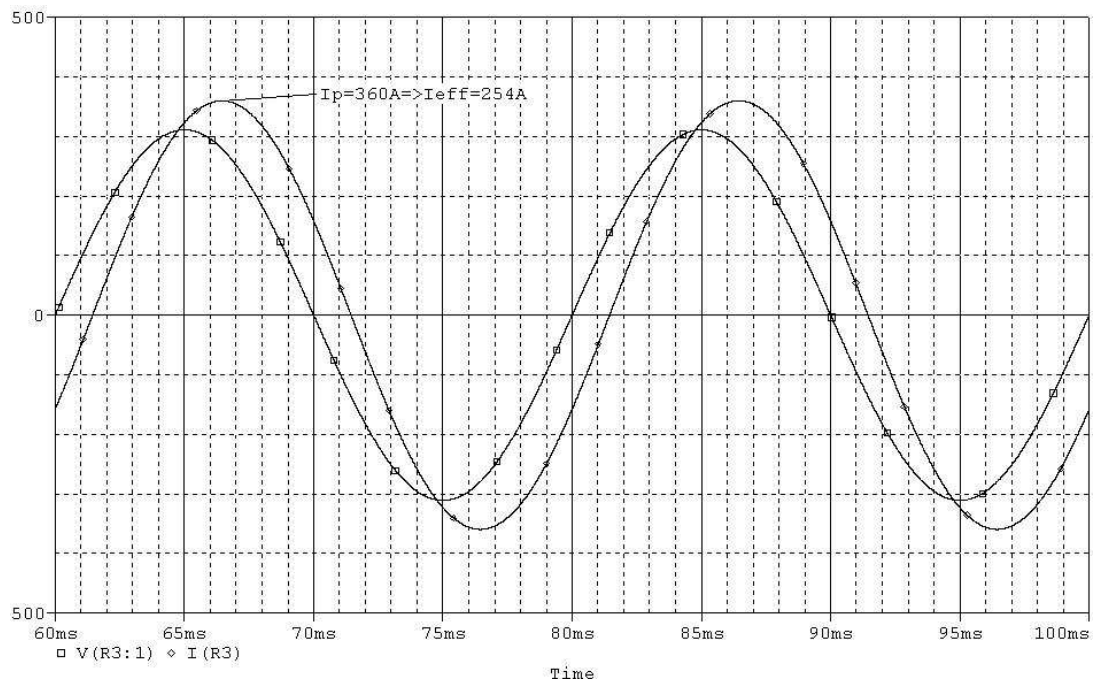
Il valore delle capacità risulterà pari a: $C_\Delta = 1,37\text{mF}$

Il nuovo circuito si presenterà come in figura sotto.



Circuito con rifasamento del carico a 0,9

e la simulazione restituirà le forme d'onda della tensione e della corrente come nella figura seguente.



Tensione e corrente dopo l'inserzione del primo banco di condensatori

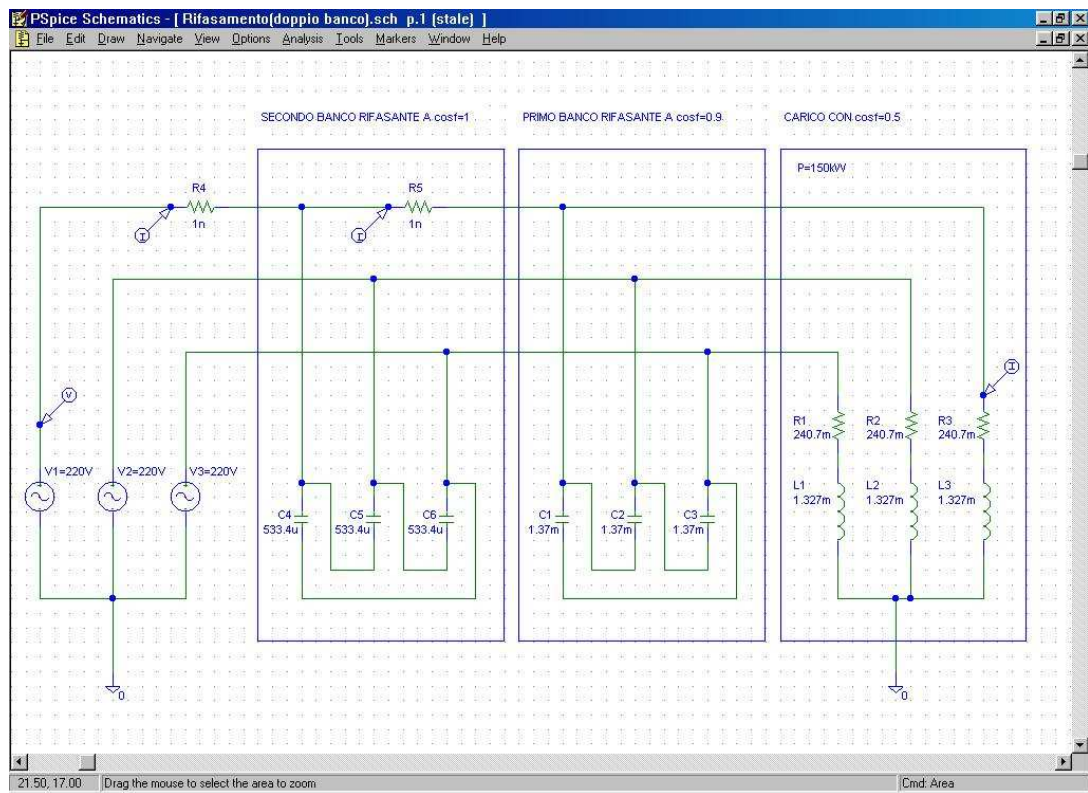
Il valore efficace della corrente passerà a 245A, mentre il fattore di potenza risulterà pari a 0,9.

Ulteriore rifasamento

Volendo rifasare il carico al fattore di potenza unitario si può inserire un nuovo banco di condensatori e utilizzando le relazioni viste prima risulterà una nuova singola capacità di

$$C_{\Delta} = 533,4\mu\text{F}$$

Il nuovo circuito comprensivo del secondo banco di condensatori diventa:



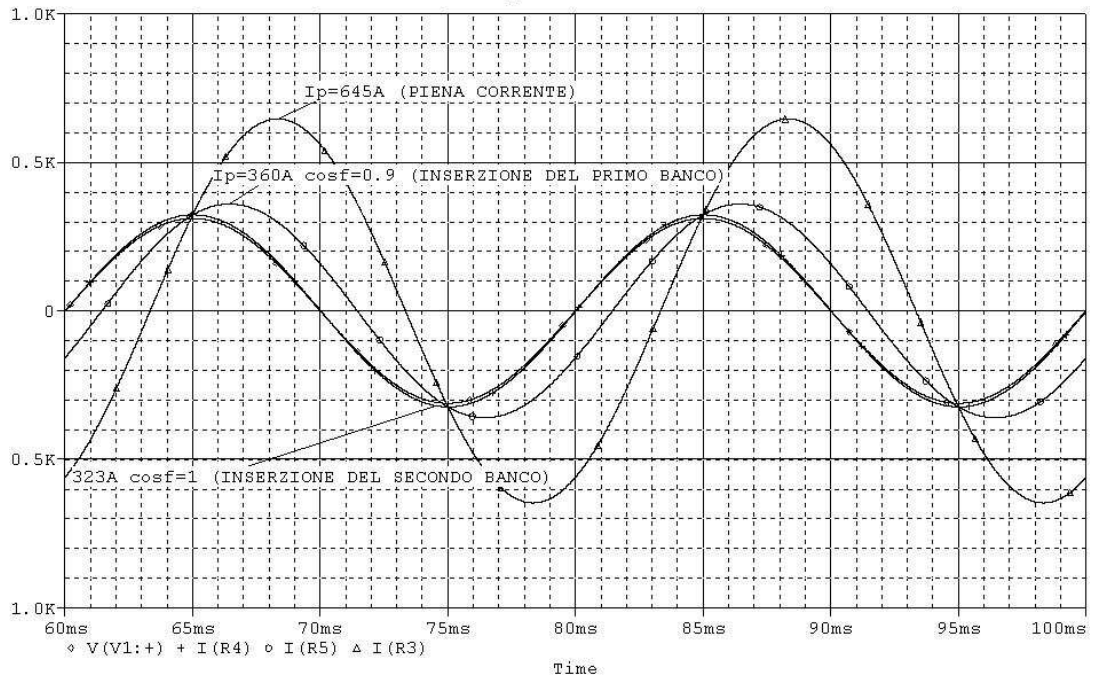
Schema del circuito con i due banchi di rifasamento

La nuova forma d'onda della corrente restituirà i valori:

$$I_p = 323\text{A}$$

$$I_{\text{eff}} = 228\text{A}$$

Nel grafico sotto sono visualizzate le curve relative alle condizioni iniziali, inserzione del primo banco di rifasamento, inserzione del secondo banco di rifasamento.



Visualizzazione della tensione e delle correnti per le tre simulazioni effettuate

Dalla figura è possibile rilevare che, dopo l'inserzione del secondo banco di condensatori, l'angolo di fase tra tensione e corrente si è annullato.

In definitiva la simulazione effettuata ha confermato, per i due casi studiati, la validità del modello matematico utilizzato sia per il calcolo delle potenze reattive capacitive necessarie sia per il calcolo delle capacità da inserire a triangolo.

PROVA PRATICA IN LABORATORIO SUL RIFASAMENTO DI UN CARICO TRIFASE

Nelle ore di laboratorio gli studenti approntano e provano fisicamente un circuito trifase. Il circuito è composto da un banco d'alimentazione trifase, un carico trifase equilibrato del tipo ohmico-induttivo con $\cos\phi < 0.9$, due wattmetri, un amperometro e un voltmetro. Inoltre, sono disponibili tre condensatori da poter collegare a triangolo per aumentare il fattore di potenza del carico al valore 0.9.

In questa fase gli alunni raggiungeranno una maggiore competenza nell'uso delle attrezzature di laboratorio: alimentazione, strumenti di misura, componenti.

Considerazioni Teoriche

Per la teoria si fa riferimento a quanto detto durante la lezione teorica sviluppata in aula. Grazie alle relazioni viste, si calcola l'opportuna capacità dei condensatori da inserire nel circuito per poter rifasare il carico a un fattore di potenza di 0,9.

In pratica, rilevati i valori della potenza attiva e reattiva assorbite dal carico, si possono calcolare il fattore di potenza o anche la $\text{tg}\phi_0$ del carico.

Infatti,

$$\text{tg}\phi_0 = \frac{Q}{P}$$

e la Q_c capacitiva necessaria per poter rifasare a $\cos\phi^I = 1$ sarà:

$$Q_c = P (\text{tg}\phi_0 - \text{tg}\phi^I)$$

mentre il valore delle tre capacità da collegare a triangolo sarà dato dalla relazione:

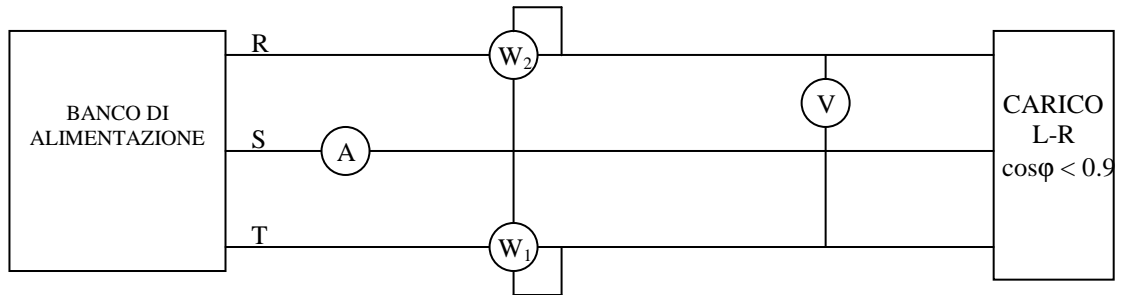
$$C_{\Delta} = \frac{Q_c}{2 \pi f U_c^2}$$

Scelta degli strumenti

Per l'esecuzione si sceglieranno due wattmetri gemelli, un carico trifase equilibrato del tipo ohmico induttivo con $\cos\phi < 0.9$, un amperometro che serve per controllare la corrente nel circuito e un voltmetro che ha la funzione di controllare la tensione tra le fasi. Inoltre, si userà un banco d'alimentazione trifase 380/220V con tensione regolabile.

Predisposizione del circuito

La prima operazione è il collegamento tra l'alimentazione, gli strumenti scelti e il carico seguendo lo schema predisposto:



Schema di montaggio

Esecuzione della misura

Dopo aver controllato l'esatta esecuzione dei collegamenti si potrà fornire l'alimentazione al circuito, variando quest'ultima in modo graduale per non far subire colpi elettrodinamici agli strumenti di misura. Arrivati a piena tensione, cioè una tensione concatenata di 380V, si vanno a rilevare i valori delle potenze indicate dai due wattmetri.

Dalla teorie sulle misure elettriche con inserzione Aron derivano le seguenti relazioni:

Potenza attiva assorbita da un carico trifase

$$P = W_1 + W_2$$

Potenza reattiva assorbita da un carico trifase equilibrato

se $W_1 > W_2$

$$Q = W_1 - W_2$$

se $W_1 < W_2$

$$Q = W_2 - W_1$$

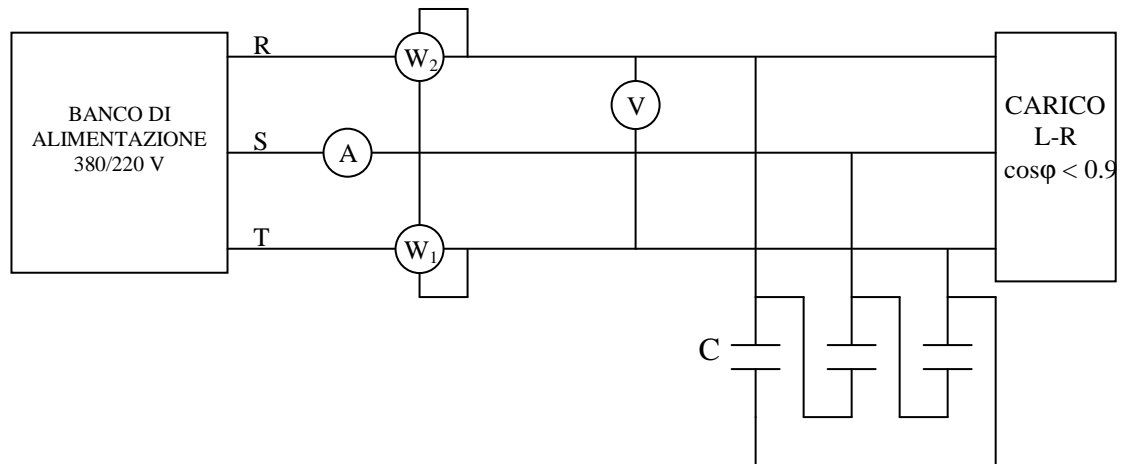
Dalla conoscenza di P e Q si può quindi ricavare il valore $\text{tg}\varphi_0$ e quindi il $\cos\varphi_0$.

Usando la relazione

$$Q_c = P (\text{tg}\varphi_0 - \text{tg}\varphi^1)$$

considerando un angolo $\phi^I = \arccos(0.9)$, si può quindi calcolare il valore della potenza reattiva capacitiva Q_c necessaria per rifasare il carico al $\cos\phi^I = 0.9$.

A questo punto si inseriscono in parallelo al carico i condensatori di opportune caratteristiche (V_n , C , f) e si vanno a rilevare i nuovi valori letti dall'ampmetro, e dai due wattmetri.



Schema del circuito rifasato

In particolare, rispetto alla precedente prova si noterà una diminuzione della corrente letta dall'ampmetro e mentre la somma delle letture dei due wattmetri sarà la stessa di prima, le singole letture risulteranno meno differenti rispetto alla prova precedente (la Q risulterà diminuita).

Osservazioni

Si raccomanda di inserire a monte del circuito, un dispositivo per la salvaguardia del circuito stesso e per la protezione degli operatori (interruttore automatico magnetotermico differenziale con corrente di sgancio differenziale $I_d = 30$ mA).

Riferimenti bibliografici

Bibliografia

Corso di Elettrotecnica, Elettronica e Applicazioni

Autore: G. Conte, M. Erbogasto, E. Venturi

Editore: Hoepli

Elettrotecnica ed Elettronica

Autore: G. Valdes

Editore: Calderini

Fondamenti di Elettrotecnica ed Elettronica

Autore: L. Olivieri, E. Ravelli

Editore: Cedam

Misure elettriche

Autore: F. Tiberio

Editore: Mursia