

4.11 Rifasamento

In un impianto elettrico utilizzatore, la potenza realmente impiegata dall'utente corrisponde alla potenza attiva (P) fornita dall'Ente distributore, mentre il dimensionamento di tutte le macchine elettriche e le linee di trasmissione va fatto in funzione della potenza apparente (S), che dipende dalla potenza attiva e da quella reattiva (Q).

La potenza reattiva, che non può essere trasformata in energia meccanica o termica (energia attiva), serve solo per creare il campo magnetico necessario al funzionamento dei motori elettrici, dei trasformatori, dei reattori necessari per alimentare le lampade a scarica nei gas, delle saldatrici, ecc.

Per l'Ente distributore assumersi il compito di produrre e trasmettere la potenza reattiva richiesta dagli impianti utilizzatori significa avere una serie di maggiori oneri, riassumibili nei seguenti due punti:

- sovradimensionamento delle linee e delle macchine elettriche costituenti le linee di trasmissione (per esempio, trasformatori);
- maggiori perdite per effetto Joule e più elevate cadute di tensione nelle macchine e nelle linee.

Nello studio degli impianti di rifasamento gioca un ruolo importante il valore del fattore di potenza $\cos \varphi$, che è il rapporto tra la potenza attiva e quella apparente: è uguale a 1 in presenza di carichi che non richiedono potenza reattiva (per esempio, carichi puramente ohmici come le lampade ad incandescenza) e inferiore a 1 quando l'Ente distributore deve fornire anche l'energia reattiva.

Quando la potenza attiva è di molto inferiore alla potenza apparente, si ha un basso fattore di potenza ($\cos \varphi$).

Le cause che in un impianto possono determinare un basso $\cos \varphi$ sono molteplici, come delineato nelle righe che seguono.

- **Motori asincroni monofase e trifase:** assorbono una corrente magnetizzante, in genere pari al 20% della corrente nominale; questi motori sono in pratica dei carichi ohmico-induttivi aventi un fattore di potenza variabile a seconda della potenza erogata. Per un motore normale, il fattore di potenza a pieno carico in funzione della potenza nominale è indicato, di seguito, dal grafico di sinistra; per altri carichi, il fattore di potenza è normalmente inferiore, secondo un coefficiente che può essere ricavato mediante il grafico di destra della fig. 4.59. Per avere il fattore di potenza ad ogni carico occorre moltiplicare il fattore di potenza a pieno carico per il coefficiente ricavabile dal grafico di destra. Nell'esempio riportato viene calcolato il fattore di potenza di un motore da 18 kW a 4 poli funzionante al 50% del carico.

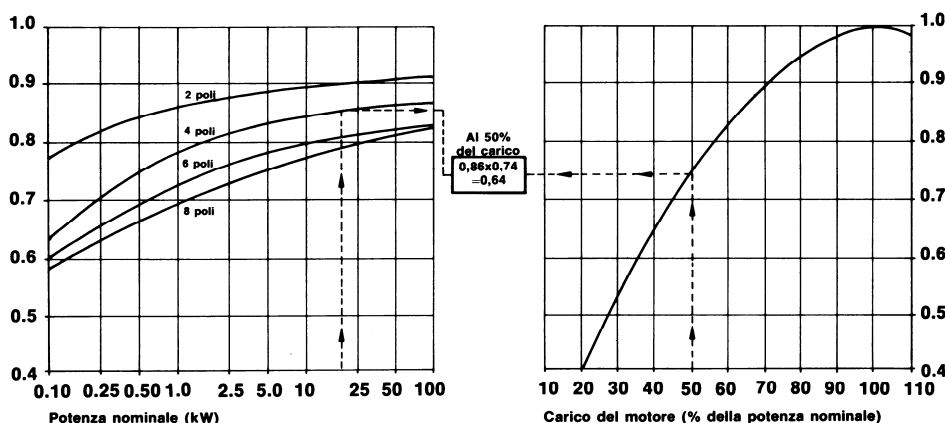


Fig. 4.59 - Determinazione del fattore di potenza di un motore asincrono trifase.

- **Trasformatori:** assorbono una certa quantità di potenza reattiva induttiva, praticamente costante al variare del carico. L'andamento del fattore di potenza in funzione del carico è simile a quella del motore asincrono, però l'assorbimento di potenza reattiva, a causa del minore traferro, è più ridotto. Mediamente, la corrente magnetizzante varia dal 4% all'8% della corrente nominale.
- **Impianti di saldatura elettrica:** essi hanno un $\cos \varphi$ molto basso (circa 0,5) a causa della presenza di un'elevata reattanza del circuito di saldatura e delle particolari caratteristiche dei trasformatori.
- **Forni ad induzione:** in cui il metallo fuso forma una spira chiusa concatenata con il flusso magnetico, con un'elevata caduta di tensione induttiva. Il valore del fattore di potenza può arrivare in alcuni casi a 0,1 o meno.

Il fattore di potenza indica quanto la corrente assorbita dal motore per le sue necessità di funzionamento è maggiore di quella che corrisponderebbe strettamente alla potenza elettrica assorbita. Per calcolare la corrente assorbita dal motore è perciò necessario conoscere il suo fattore di potenza.

Nota: quando il motore funziona a vuoto, il fattore di potenza è molto basso: a seconda dei motori esso è compreso tra 0,1 e 0,2.

- **Lampade a scarica nei gas (al neon, al sodio, al mercurio):** data la presenza del reattore, sono in pratica dei carichi ohmico-induttivi. Il valore del $\cos \varphi$ vale 0,5; normalmente, però, gli apparecchi illuminanti sono dotati di un proprio condensatore di rifasamento in parallelo all'alimentazione che porta il valore a $0,86 \div 0,93$.

Tipo di apparecchiatura		Fattore di potenza $\cos \varphi$	$\tan \varphi$
Motore asincrono trifase:	0	0,17	5,80
	25	0,55	1,52
	50	0,73	0,94
	75	0,80	0,75
	100	0,85	0,62
Fattore di carico %			
Lampada a incandescenza		≈ 1	≈ 0
Lampada fluorescente non rifasata		$\approx 0,5$	$\approx 1,73$
Lampada fluorescente rifasata		$0,86 \div 0,93$	$0,59 \div 0,39$
Lampada a scarica		$0,4 \div 0,6$	$2,29 \div 1,33$
Forni a resistenza		≈ 1	≈ 0
Saldatura a punti		$0,8 \div 0,9$	$0,75 \div 0,48$
Saldatura ad arco alimentata:	gruppo statico monofase	$\approx 0,5$	$\approx 1,73$
	trasformatore-raddrizzatore	$0,7 \div 0,8$	$1,02 \div 0,75$

Tab. 4.44 - Fattore di potenza $\cos \varphi$ di alcune apparecchiature.

L'Ente distributore, in funzione della potenza reattiva richiesta o del $\cos \varphi$ dell'impianto, applica all'utente tariffe differenziate; precisamente, dato che minor $\cos \varphi$ significa maggiore potenza reattiva e, quindi, maggiori oneri finanziari, vengono applicate delle penalità quando il fattore di potenza scende al di sotto di valori prefissati (la normativa prevede per gli impianti con una potenza elettrica impegnata maggiore di 15 kW il controllo del fattore di potenza ed eventualmente il rifasamento).

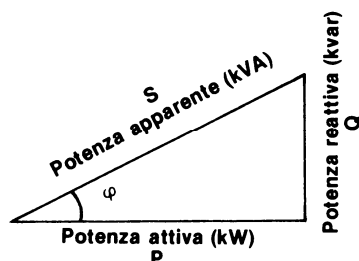
A tale proposito, è stato stabilito che, per le utenze in bassa tensione con potenza impegnata maggiore di 15 kW, venga applicata una tariffa anche per la potenza reattiva e in particolare:

- per $\cos \varphi < 0,7$ vi è l'obbligo di rifasamento;
- per $0,7 \leq \cos \varphi < 0,9$ non c'è obbligo di rifasamento, ma l'utente paga una quota di energia reattiva; la decisione se effettuare o meno il rifasamento deve essere presa in base a criteri di convenienza economica, valutando la spesa annua sopportata per l'energia reattiva, il costo dell'impianto di rifasamento, la durata dello stesso e il tempo occorrente per ammortizzare la spesa;
- per $\cos \varphi \geq 0,9$ non c'è obbligo di rifasamento e non si paga nessuna quota di energia reattiva.

Il problema della regolazione del fattore di potenza, se per l'ente distributore significa possibilità di maggiore disponibilità di potenza negli impianti di trasmissione e minori oneri per il dimensionamento degli stessi, per l'utilizzatore costituisce uno dei criteri fondamentali per una razionale ed economica gestione dell'impianto.

Il fattore di potenza si può determinare mediante appositi strumenti oppure in base alle letture del contatore di energia attiva e del contatore di energia reattiva.

Sono già stati richiamati i concetti di potenza ed energia attiva; aggiungiamo che la potenza reattiva (che produce, nel tempo, energia reattiva) è quella impegnata per far funzionare i circuiti magnetici delle macchine elettriche. Potenza apparente, potenza attiva e potenza reattiva stanno tra loro come l'ipotenusa e i cateti di un triangolo rettangolo.



Il teorema di Pitagora consente di calcolare una delle tre grandezze se sono note le altre due. Infatti, usando i simboli della figura:

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

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

Osservando il triangolo, si vede che, a parità di potenza attiva P, la potenza apparente aumenta con il crescere della potenza reattiva Q e dell'angolo φ fra P e S.

Sempre osservando la figura, è possibile scrivere, utilizzando nozioni elementari di trigonometria, che:

$$P = S \cdot \cos \varphi$$

$$Q = S \cdot \sin \varphi$$

$$Q/P = \tan \varphi$$

In particolare, si ha che: $\cos \varphi = P/S$.

Se si indica con E_r e E_a , rispettivamente, l'energia reattiva (in kvarh) e attiva (in kWh) consumate in un certo periodo e dedotte dalle letture dei rispettivi contatori e si effettua il rapporto E_r/E_a , utilizzando apposite tabelle, è possibile ottenere direttamente il valore del fattore di potenza medio nel periodo considerato.

Fig. 4.60 - Relazione tra la potenza apparente (S), la potenza attiva (P) e la potenza reattiva (Q).

Per determinare in un dato istante il fattore di potenza, si può contare il numero dei giri del disco di ciascuno dei due contatori di energia (attiva e reattiva) in un minuto.

Se, per esempio, vengono contati 22 giri sul contatore di energia attiva e 20 giri sul contatore di energia reattiva, tenendo conto dei rapporti dei riduttori di tensione e di corrente e delle costanti rilevabili dalle targhe (2100 giri/kWh e 1800 giri/kvarh), si ottiene:

$$E_a = 22/2100 \cdot 15/0,10 \cdot 10/5 = 3,14 \text{ kWh}$$

$$E_r = 20/1800 \cdot 15/0,10 \cdot 10/5 = 3,33 \text{ kvarh}$$

$$\cos \varphi = E_a / \sqrt{E_a^2 + E_r^2}$$

$$\cos \varphi = 3,14 / \sqrt{3,14^2 + 3,33^2} = 0,69$$



a



TRASF. TENS. RAPP. =	15/0,10 KV
TRASF. CORR. RAPP. =	10/5 A
COSTANTE (K.) =	300
IND. MAX.: 1 DIV. =	3 KW

b

Fig. 4.61 - a) Esempi di dati di targa di un contatore di energia attiva e di uno di energia reattiva - b) Esempio di caratteristiche dei riduttori di tensione e di corrente (ENEL).

Di seguito viene invece presentata una tabella che consente di determinare il fattore di potenza dalle letture del consumo mensile dei contatori di energia reattiva (E_r) e attiva (E_a).

Se si rileva un consumo mensile di 5000 kWh e 3400 kvarh, il rapporto E_r/E_a sarà uguale a 3400/5000 ossia 0,68. Utilizzando la tab. 4.45, in corrispondenza di tale valore, si ottiene un fattore di potenza uguale a $\cos \varphi = 0,83$.

E_r / E_a	$\cos \varphi$	E_r / E_a	$\cos \varphi$	E_r / E_a	$\cos \varphi$	E_r / E_a	$\cos \varphi$	E_r / E_a	$\cos \varphi$
0,11 ÷ 0,17	0,99	0,50 ÷ 0,52	0,89	0,77 ÷ 0,79	0,79	1,04 ÷ 1,06	0,69	1,36 ÷ 1,38	0,59
0,18 ÷ 0,23	0,98	0,53 ÷ 0,55	0,88	0,80 ÷ 0,81	0,78	1,07 ÷ 1,09	0,68	1,39 ÷ 1,42	0,58
0,24 ÷ 0,27	0,97	0,56 ÷ 0,58	0,87	0,82 ÷ 0,84	0,77	1,10 ÷ 1,12	0,67	1,43 ÷ 1,46	0,57
0,28 ÷ 0,31	0,96	0,59 ÷ 0,60	0,86	0,85 ÷ 0,86	0,76	1,13 ÷ 1,15	0,66	1,47 ÷ 1,50	0,56
0,32 ÷ 0,34	0,95	0,61 ÷ 0,63	0,85	0,87 ÷ 0,89	0,75	1,16 ÷ 1,18	0,65	1,51 ÷ 1,54	0,55
0,35 ÷ 0,38	0,94	0,64 ÷ 0,66	0,84	0,90 ÷ 0,92	0,74	1,19 ÷ 1,21	0,64	1,55 ÷ 1,58	0,54
0,39 ÷ 0,41	0,93	0,67 ÷ 0,68	0,83	0,93 ÷ 0,95	0,73	1,22 ÷ 1,25	0,63	1,59 ÷ 1,62	0,53
0,42 ÷ 0,44	0,92	0,69 ÷ 0,71	0,82	0,96 ÷ 0,97	0,72	1,26 ÷ 1,28	0,62	1,63 ÷ 1,66	0,52
0,45 ÷ 0,47	0,91	0,72 ÷ 0,73	0,81	0,98 ÷ 1,00	0,71	1,29 ÷ 1,31	0,61	1,67 ÷ 1,71	0,51
0,48 ÷ 0,49	0,90	0,74 ÷ 0,76	0,80	1,01 ÷ 1,03	0,70	1,32 ÷ 1,35	0,60	1,72 ÷ 1,75	0,50

Tab. 4.45 - Determinazione del fattore di potenza dalle letture dei contatori di energia reattiva (E_r) e attiva (E_a) (ENEL).

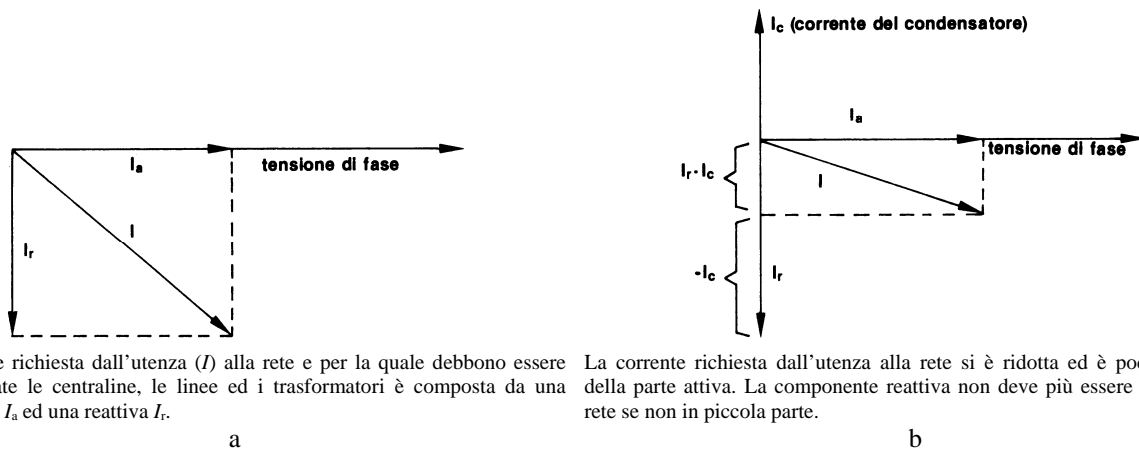
Si può migliorare il fattore di potenza utilizzando le macchine in modo razionale. In particolare:

- usando i motori e trasformatori correttamente dimensionati, in modo che non debbano funzionare troppo a lungo a carico ridotto;
- non lasciando motori e trasformatori in funzione senza carico;
- non mantenendo in funzione motori difettosi.

Quando accorgimenti come quelli ora citati non migliorano sufficientemente il fattore di potenza, occorre rifasare. Per rifasare si ricorre normalmente ai condensatori statici. Infatti, la potenza reattiva impegnata dai carichi induttivi di un impianto utilizzatore, invece di essere prodotta e trasmessa con i conseguenti oneri dall'Ente distributore, può essere resa disponibile presso l'apparecchio utilizzatore semplicemente allacciando alla rete un condensatore; esso, assorbendo una corrente in opposizione di fase con la corrente assorbita dai carichi induttivi, funziona in pratica da generatore di potenza reattiva nei confronti dei carichi induttivi posti a valle, innalzando, in proporzione alla loro potenza, il fattore di potenza del sistema.

Questo apporto di potenza reattiva, a parità di potenza attiva, consente:

- una diminuzione della potenza reattiva richiesta alla rete;
- una conseguente diminuzione della potenza apparente e, quindi, della corrente richiesta;
- minori cadute di tensione e minori perdite negli impianti a monte e, in particolare, nei conduttori di alimentazione.



La corrente richiesta dall'utenza (I) alla rete e per la quale debbono essere dimensionate le centraline, le linee ed i trasformatori è composta da una parte attiva I_a ed una reattiva I_r .

La corrente richiesta dall'utenza alla rete si è ridotta ed è poco maggiore della parte attiva. La componente reattiva non deve più essere fornita dalla rete se non in piccola parte.

Fig. 4.62 - Rappresentazione vettoriale della corrente richiesta dall'utenza prima (a) e dopo il rifasamento (b).

Lampada tubolare fluorescente	Motore trifase
Lampada tubolare fluorescente da 40 W (50 W con il reattore), alimentata a 230 V.	Motore trifase da 7500 W, alimentato a 400 V con un rendimento di 0,8 a pieno carico.
<ul style="list-style-type: none"> Se il fattore di potenza fosse 1 assorbirebbe una corrente di: $50/230 = 0,21$ A Invece, con il fattore di potenza di 0,6, la corrente assorbita risulta: $0,21/0,6 = 0,36$ A cioè circa il 58% in più. 	<ul style="list-style-type: none"> Se il fattore di potenza fosse 1 assorbirebbe una corrente di: $7500/(1,732 \cdot 400 \cdot 0,8) = 13,53$ A (il fattore $\sqrt{3} \approx 1,732$ compare perché il motore è trifase) Invece, con il fattore di potenza di 0,84, il motore assorbe: $13,53/0,84 = 16,30$ A cioè circa il 20% in più.

Tab. 4.46 - Esempi di influenza del basso fattore di potenza sul prelievo di corrente dalla rete di distribuzione.

L'ideale sarebbe avere un fattore di potenza di poco superiore a 0,9 per non pagare le penalità previste dalla legge e, nello stesso tempo, per non correre il rischio di avere, con un $\cos \varphi$ troppo prossimo all'unità, un fattore di potenza in anticipo quando l'apparecchio rifasato lavora a basso carico. In nessun caso, comunque, secondo le vigenti normative, l'impianto dell'utente deve erogare potenza reattiva alla rete.

I criteri secondo cui effettuare il rifasamento sono molteplici e la loro scelta è in funzione della natura dei carichi, della loro distribuzione nell'impianto, del tipo di servizio e dell'andamento giornaliero del carico.

Si deve innanzi tutto scegliere tra rifasamento distribuito, per gruppi o centralizzato.

Potenza nominale [kW]	Potenza capacitiva [kvar]				
	2 poli	4 poli	6 poli	8 poli	12 poli
2,2	1	1	1	1,5	1,5
3,7	1,5	1,5	1,5	2	2
7,5	3,5	4	4	4	5
11	4	5	6	6	10
15	5	6	7	7	12
22	7,5	10	10	12,5	15
30	10	12,5	15	15	20
37	15	15	15	20	25
55	15	20	20	25	30
74	25	30	35	35	40
110	40	40	45	50	60
148	45	50	50	60	80
162	45	50	60	70	80

Tab. 4.47 - Potenza capacitiva necessaria per il rifasamento singolo dei motori asincroni trifase in funzione della potenza nominale e del numero dei poli per ottenere un fattore di potenza non inferiore a 0,9.

Nel primo caso, le unità di rifasamento sono disposte nelle immediate vicinanze di ogni singolo carico che si vuole rifasare. Ciò è ottenibile, per esempio, allacciando direttamente i condensatori ai morsetti delle utenze che richiedono potenza reattiva induttiva.

Il rifasamento distribuito è, in linea di principio, la soluzione tecnica preferibile: condensatore e apparecchio utilizzatore seguono esattamente le stesse vicende durante l'esercizio giornaliero dei carichi, per cui la regolazione del $\cos \varphi$ diviene sistematica ed automatica.

Inoltre, rifasando "localmente" non è solo l'Ente distributore che beneficia di uno sgravio di energia reattiva, ma anche tutta la distribuzione interna dell'utente.

Negli impianti industriali, per esempio, il risparmio conseguibile con il rifasamento distribuito, oltre che sotto forma tariffaria, si manifesta anche nel dimensionamento di tutte le linee interne allo stabilimento che collegano la cabina MT/BT con i carichi rifasati.

Un altro vantaggio relativo al rifasamento distribuito è l'installazione semplice e poco costosa, poiché condensatore e carico vengono inseriti e disinseriti contemporaneamente e possono usufruire delle stesse protezioni contro sovraccarichi e cortocircuiti. In definitiva, in rifasamento distribuito:

- permette di ridurre le perdite e le cadute di tensione in tutti i conduttori sino ai morsetti dell'apparecchio utilizzatore (ed è, quindi, fonte di economie nella realizzazione dell'impianto dell'utente);
- non richiede, salvo casi particolari, organi di protezione e di manovra appositi per il condensatore, perché si fa uso degli apparecchi di manovra dell'impianto da rifasare.

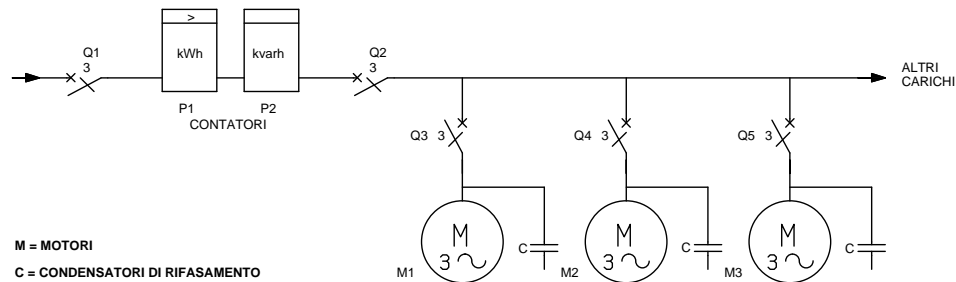


Fig. 4.63 - Esempio di schema di rifasamento distribuito.

Se però gli apparecchi da rifasare sono molti e non vengono usati contemporaneamente, questa soluzione può risultare meno economica di quelle esposte di seguito.

Il rifasamento per gruppi consiste nell'installare uno o più condensatori di potenza complessiva adeguata per ogni gruppo di apparecchi alimentati da uno stesso cavo o disposti in uno stesso reparto.

I condensatori possono essere inseriti o disinseriti secondo le necessità da un regolatore automatico di $\cos \varphi$.

Nel rifasamento centralizzato si installa un'unica batteria di condensatori a monte di tutti i carichi da rifasare e immediatamente a valle del punto di misura del fattore di potenza, per esempio, nella cabina di trasformazione MT/BT o in prossimità del quadro generale dell'impianto. L'andamento giornaliero dei carichi ha un'importanza fondamentale per la scelta del tipo di rifasamento più conveniente.

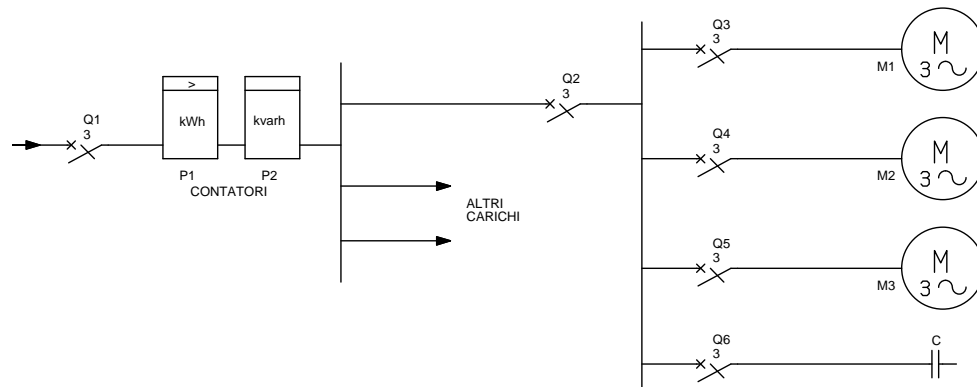


Fig. 4.64 - Esempio di schema di rifasamento per gruppi.

Vi sono molti impianti in cui non tutte le utenze vengono utilizzate contemporaneamente, ed alcune funzionano solo poche ore al giorno. In questi impianti è evidente che la soluzione del rifasamento distribuito diventa troppo onerosa a causa del costo complessivo dei condensatori: per avere i condensatori necessari ad ottenere $\cos \varphi = 0,9$ nel caso, raro, di utilizzo contemporaneo di tutti i carichi, si lascerebbero molti condensatori per lungo tempo inutilizzati.

In definitiva, il rifasamento distribuito conviene quando la maggior parte della potenza reattiva richiesta è concentrata in pochi grossi carichi che lavorano parecchie ore al giorno.

Il rifasamento centralizzato conviene, invece, nel caso di impianti con molti carichi eterogenei che lavorano saltuariamente, per cui si ha un'elevata potenza installata e un assorbimento medio di energia da parte dei carichi in servizio contemporaneo abbastanza modesto; con il rifasamento centralizzato, in questo caso, la potenza della batteria risulta notevolmente inferiore alla potenza complessiva che sarebbe necessaria prevedendo il rifasamento

distribuito, tenendo anche presente che il costo per kvar di un condensatore di grossa potenza è inferiore a quello di piccoli condensatori.

La batteria può essere collegata permanentemente solo se l'assorbimento di energia reattiva è abbastanza regolare durante la giornata, altrimenti deve essere variata per evitare di avere il $\cos \varphi$ in anticipo.

Quando l'assorbimento di potenza reattiva è molto variabile durante il funzionamento dell'impianto, è necessaria una regolazione automatica con una batteria frazionata in più gradini. La manovra manuale è consigliabile quando la batteria deve essere azionata, per esempio, due volte al giorno.

La batteria deve essere inserita all'inizio del periodo di lavoro e disinserita al termine dello stesso, per evitare di fornire alla rete, nei periodi di inattività dello stabilimento, potenza reattiva.

Se la richiesta di potenza reattiva ha escursioni notevoli, è necessario prevedere un comando automatico di inserzione e disinserzione dei condensatori. Questo schema di rifasamento appare il più semplice, ma non riduce le cadute di tensione e le perdite nell'impianto a valle, cioè all'interno dello stabilimento.

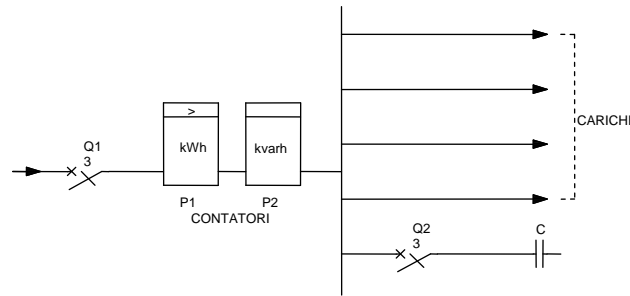


Fig. 4.65 - Esempio di schema di rifasamento centralizzato.

Nella pratica risulta spesso opportuno ricorrere ad un rifasamento misto, distribuito in parte presso gli apparecchi utilizzatori maggiori, in parte all'inizio di certi cavi che alimentano gruppi di apparecchi e per la restante parte centralizzato a valle del gruppo di misura.

La potenza necessaria della batteria di condensatori per ottenere un determinato rifasamento dipende dalla potenza del carico che si vuole rifasare e, ovviamente, dal $\cos \varphi$ di partenza e dal $\cos \varphi$ che si vuole ottenere.

Usando delle tabelle tipo la tab. 4.48, è possibile determinare, per ogni valore di $\cos \varphi$ prima e dopo il rifasamento, la potenza necessaria della batteria di condensatori in kvar per kW installato.

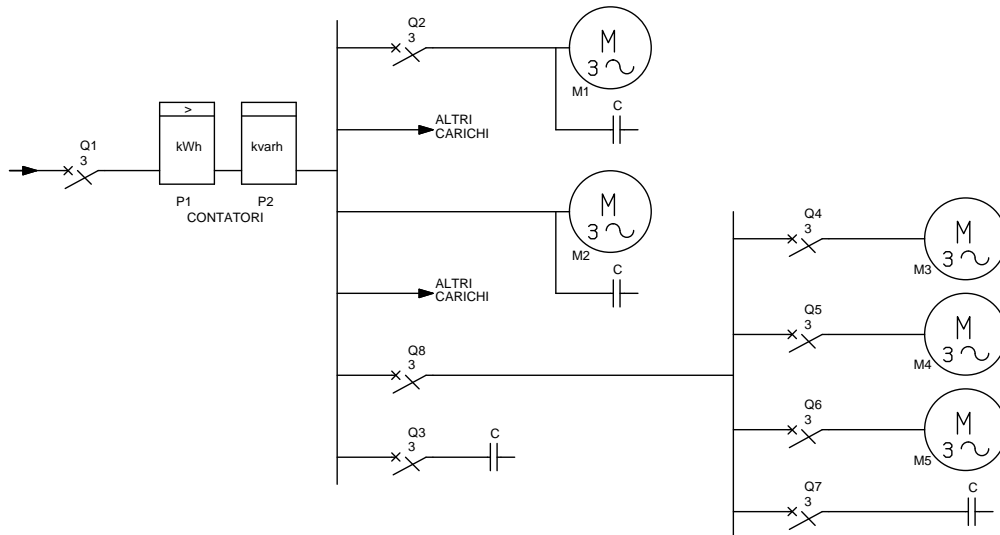


Fig. 4.66 - Esempio di schema di rifasamento misto.

Se, per esempio, si ha un impianto con una potenza attiva media di 200 kW e un $\cos \varphi$ di partenza medio di 0,50 e lo si vuole portare a 0,95 ($\cos \varphi$ da ottenere), per ottenere il valore della potenza della batteria di rifasamento occorre moltiplicare il valore della potenza attiva per il coefficiente 1,403, che si trova nella tab. 4.48.

In questo caso, si ottiene $Q = 1,403 \cdot 200 = 280600$ var e si sceglie un valore commerciale di 280 kvar.

Coefficiente moltiplicativo per il calcolo della potenza del condensatore in kVAR/kW per elevare il fattore di potenza ($\cos\varphi$) a:
 Multiplying coefficient to calculate the capacitor power in kVAR/kW in order to raise the power factor ($\cos\varphi$) to:

Cos φ di partenza Initial power factor	Cos φ da ottenere Power factor to be obtained	0.80	0.85	0.90	0.91	0.92	0.93	0.94	0.95	0.96	0.97	0.98	0.99	1
0.40		1.557	1.668	1.805	1.832	1.861	1.895	1.924	1.959	1.998	2.037	2.085	2.146	2.288
0.41		1.474	1.605	1.742	1.769	1.798	1.831	1.860	1.896	1.935	1.973	2.021	2.082	2.225
0.42		1.413	1.544	1.681	1.709	1.738	1.771	1.800	1.836	1.874	1.913	1.961	2.022	2.164
0.43		1.356	1.487	1.624	1.709	1.680	1.713	1.742	1.778	1.816	1.855	1.903	1.964	2.107
0.44		1.290	1.421	1.558	1.651	1.614	1.647	1.677	1.712	1.751	1.790	1.837	1.899	2.041
0.45		1.230	1.360	1.501	1.585	1.561	1.592	1.626	1.659	1.695	1.737	1.784	1.846	1.988
0.46		1.179	1.309	1.446	1.532	1.502	1.533	1.567	1.600	1.636	1.677	1.725	1.786	1.929
0.47		1.130	1.260	1.397	1.473	1.454	1.485	1.519	1.532	1.588	1.629	1.677	1.758	1.881
0.48		1.076	1.206	1.343	1.425	1.400	1.430	1.464	1.497	1.534	1.575	1.623	1.684	1.826
0.49		1.030	1.160	1.297	1.370	1.355	1.386	1.420	1.453	1.489	1.530	1.578	1.639	1.782
0.50		0.982	1.112	1.248	1.326	1.303	1.337	1.369	1.403	1.441	1.481	1.529	1.590	1.732
0.51		0.936	1.066	1.202	1.276	1.257	1.291	1.323	1.357	1.395	1.435	1.483	1.544	1.686
0.52		0.894	1.024	1.160	1.230	1.215	1.249	1.281	1.315	1.353	1.393	1.441	1.502	1.644
0.53		0.850	0.980	1.116	1.188	1.171	1.205	1.237	1.271	1.309	1.349	1.397	1.458	1.600
0.54		0.809	0.939	1.075	1.144	1.130	1.164	1.196	1.230	1.268	1.308	1.356	1.417	1.559
0.55		0.769	0.899	1.035	1.103	1.090	1.124	1.156	1.190	1.228	1.268	1.316	1.377	1.519
0.56		0.730	0.865	0.996	1.063	1.051	1.085	1.117	1.151	1.189	1.229	1.277	1.338	1.480
0.57		0.692	0.822	0.958	0.986	1.013	1.047	1.079	1.113	1.151	1.191	1.239	1.300	1.442
0.58		0.665	0.785	0.921	0.949	0.976	1.010	1.042	1.076	1.114	1.154	1.202	1.263	1.405
0.59		0.618	0.748	0.884	0.912	0.939	0.973	1.005	1.039	1.077	1.117	1.165	1.226	1.368
0.60		0.584	0.714	0.849	0.878	0.905	0.939	0.971	1.005	1.043	1.083	1.131	1.192	1.334
0.61		0.549	0.679	0.815	0.843	0.870	0.904	0.936	0.970	1.008	1.048	1.096	1.157	1.299
0.62		0.515	0.645	0.781	0.809	0.836	0.870	0.902	0.936	0.974	1.014	1.062	1.123	1.265
0.63		0.483	0.613	0.749	0.777	0.804	0.838	0.870	0.904	0.942	0.982	1.030	1.091	1.233
0.64		0.450	0.580	0.716	0.744	0.771	0.805	0.837	0.871	0.909	0.949	0.997	1.058	1.200
0.65		0.419	0.549	0.685	0.713	0.740	0.774	0.806	0.840	0.878	0.918	0.966	1.007	1.169
0.66		0.388	0.518	0.654	0.682	0.709	0.743	0.775	0.809	0.847	0.887	0.935	0.996	1.138
0.67		0.358	0.488	0.624	0.652	0.679	0.713	0.745	0.779	0.817	0.857	0.905	0.966	1.108
0.68		0.329	0.459	0.595	0.623	0.650	0.684	0.716	0.750	0.788	0.828	0.876	0.937	1.079
0.69		0.299	0.429	0.565	0.593	0.620	0.654	0.686	0.720	0.758	0.798	0.840	0.907	1.049
0.70		0.270	0.400	0.536	0.564	0.591	0.625	0.657	0.691	0.729	0.769	0.811	0.878	1.020
0.71		0.242	0.372	0.508	0.536	0.563	0.597	0.629	0.663	0.701	0.741	0.783	0.850	0.992
0.72		0.213	0.343	0.479	0.507	0.534	0.568	0.600	0.634	0.672	0.712	0.754	0.821	0.963
0.73		0.186	0.316	0.452	0.480	0.507	0.541	0.573	0.607	0.645	0.685	0.727	0.794	0.936
0.74		0.159	0.289	0.425	0.453	0.480	0.514	0.546	0.580	0.618	0.658	0.700	0.767	0.909
0.75		0.132	0.262	0.398	0.426	0.453	0.487	0.519	0.553	0.591	0.631	0.673	0.740	0.882
0.76		0.105	0.235	0.371	0.399	0.426	0.460	0.492	0.526	0.564	0.604	0.652	0.713	0.855
0.77		0.079	0.209	0.345	0.373	0.400	0.434	0.466	0.500	0.538	0.578	0.620	0.687	0.829
0.78		0.053	0.183	0.319	0.347	0.374	0.408	0.440	0.474	0.512	0.552	0.594	0.661	0.803
0.79		0.026	0.156	0.292	0.320	0.347	0.381	0.413	0.447	0.485	0.525	0.567	0.634	0.776
0.80		—	0.130	0.266	0.294	0.321	0.355	0.387	0.421	0.459	0.499	0.541	0.608	0.750
0.81		—	0.104	0.240	0.268	0.295	0.329	0.361	0.395	0.433	0.473	0.515	0.582	0.724
0.82		—	0.078	0.214	0.242	0.269	0.303	0.335	0.369	0.407	0.447	0.489	0.556	0.698
0.83		—	0.052	0.188	0.216	0.243	0.277	0.309	0.343	0.381	0.421	0.463	0.530	0.672
0.84		—	0.026	0.162	0.190	0.217	0.251	0.283	0.317	0.355	0.395	0.437	0.504	0.645
0.85		—	—	0.136	0.164	0.191	0.225	0.257	0.291	0.329	0.369	0.417	0.478	0.620
0.86		—	—	0.109	0.140	0.167	0.198	0.230	0.264	0.301	0.343	0.390	0.450	0.593
0.87		—	—	0.083	0.114	0.141	0.172	0.204	0.238	0.275	0.317	0.364	0.424	0.567
0.88		—	—	0.054	0.085	0.112	0.143	0.175	0.209	0.246	0.288	0.335	0.395	0.538
0.89		—	—	0.028	0.059	0.086	0.117	0.149	0.183	0.230	0.262	0.309	0.369	0.512
0.90		—	—	—	0.031	0.058	0.089	0.121	0.155	0.192	0.234	0.281	0.341	0.484

Tab. 4.48 - Determinazione della potenza di una batteria di condensatori per il rifasamento (ABB SACE).

Riguardo alle grandezze caratteristiche dei condensatori, può essere utile ricordare che i valori assunti sono in funzione del tipo di sistema (monofase e trifase) e del tipo di collegamento (trifase a stella o a triangolo).

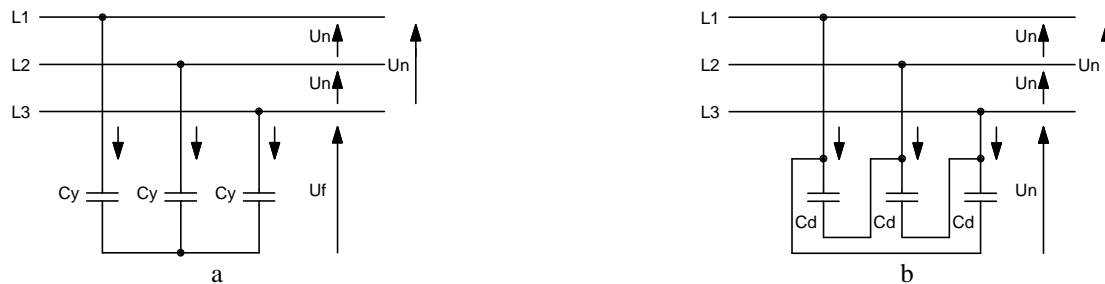


Fig. 4.67 - Collegamento dei condensatori di rifasamento: a) a stella - b) a triangolo.

I dati caratteristici di un condensatore, forniti dalla sua targa, sono:

- tensione nominale U_n , che il condensatore deve poter sopportare indefinitamente;
- frequenza nominale f_n (comunemente pari a quella di rete, 50 Hz);
- potenza nominale Q_n , espressa generalmente in kvar (potenza reattiva della batteria di condensatori).

Dai dati di targa, le grandezze caratteristiche del condensatore possono essere ricavate con le seguenti formule:

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

$$C = Q_n / 2 \cdot \pi \cdot f_n \cdot U_n^2$$

e la corrente nominale:

$$I_n = 2 \cdot \pi \cdot f_n \cdot C \cdot U_n$$

- per ciascuno dei tre condensatori di una unità trifase, si ha invece, (U_n = tensione concatenata del sistema):

1) con il collegamento a stella (y)

$$C_y = Q_n / 2 \cdot \pi \cdot f_n \cdot U_n^2;$$

$$I_n = I_l = 2 \cdot \pi \cdot f_n \cdot C_y \cdot U_n / \sqrt{3}$$

2) con il collegamento a triangolo (Δ)

$$C_{\Delta} = Q_n / 3 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_n \cdot U_n^2; \quad I_n = 2 \cdot \pi \cdot f_n \cdot C_{\Delta} \cdot U_n; \quad I_l = \sqrt{3} \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_n \cdot C_{\Delta} \cdot U_n$$

dove I_n è la corrente che attraversa il condensatore e I_l è la corrente di linea.

Da quanto esposto precedentemente, si deduce che, a parità di potenza reattiva, la connessione a stella richiede capacità 3 volte superiori e sottopone i condensatori ad una tensione $\sqrt{3}$ volte minore.

È per questi motivi che viene normalmente utilizzato il collegamento a triangolo per gli impianti funzionanti in bassa tensione, mentre si preferisce utilizzare il collegamento a stella per gli impianti a media ed alta tensione.

Ragionando, invece, a parità di capacità, cioè con gli stessi 3 condensatori, se il collegamento è a stella la potenza reattiva fornita è 3 volte minore (essendo $\sqrt{3}$ volte minore sia la corrente che la tensione sul condensatore) rispetto al caso di collegamento a triangolo.

Per quanto riguarda le caratteristiche tecniche, i normali condensatori per rifasamento a bassa tensione sono costituiti da elementi capacitivi immersi in olio speciale e contenuti in cassette metalliche ermeticamente chiuse. Ogni cassetta è provvista di morsetti di collegamento al circuito da rifasare e per la messa a terra.

Sono disponibili in commercio sia unità monofasi sia unità trifasi; queste ultime, in particolare, sono spesso costituite da unità monofasi già collegate fra di loro a triangolo e pronte per l'inserzione sulla rete trifase.

Per effettuare l'ordinazione è necessario conoscere le seguenti caratteristiche:

- tipo monofase o trifase, a bassa tensione e anche a media tensione, fino a 200 kvar: sono in commercio tanto unità monofasi quanto unità trifasi; per potenze maggiori sono consigliabili unità monofasi da collegare in gruppi trifase;
- potenza nominale in kvar: si tratta in genere di scegliere, tra i valori indicati sui cataloghi dei costruttori, quelli più vicini ai valori calcolati;
- tensione nominale: (è necessario verificare qual è il valore effettivo della tensione nel punto previsto di inserzione) è la tensione più elevata alla quale il condensatore può funzionare con continuità;
- frequenza nominale: in Italia e in Europa, in genere, la frequenza è di 50 Hz; da notare che la potenza di un condensatore, costruito per funzionare per la frequenza americana di 60 Hz, si riduce nel rapporto di 50/60 in caso di impiego sulla rete italiana (per esempio, da 100 a 83 kvar);
- temperatura massima di funzionamento (sono usuali due classi: normale 40 °C e speciale 45 °C);
- eventuale presenza di dispositivi di inserzione e disinserzione automatica;
- necessità del dispositivo di scarica, atto a ridurre, secondo le norme di sicurezza, la tensione ai morsetti del condensatore a meno di 50 V entro un minuto dalla sua disinserzione dalla rete; tale dispositivo non è richiesto solo quando il condensatore è collegato direttamente in parallelo con un motore o con altro avvolgimento, poiché in tale caso la scarica avviene attraverso gli avvolgimenti della macchina.

Attualmente, la maggioranza dei condensatori vengono costruiti con un resistore interno che provvede a scaricarli adeguatamente.

La presenza di questo resistore è indicata sulla targa. Inoltre, possono essere presenti delle induttanze di protezione dalle sovracorrenti che si hanno all'atto della loro inserzione.

Alcuni costruttori inseriscono fusibili nelle custodie dei condensatori, in modo che eventuali elementi interni guasti vengano automaticamente scollegati dalla rete, consentendo la continuità del servizio, sia pure con un modesto squilibrio della generazione di potenza reattiva sulle varie fasi.

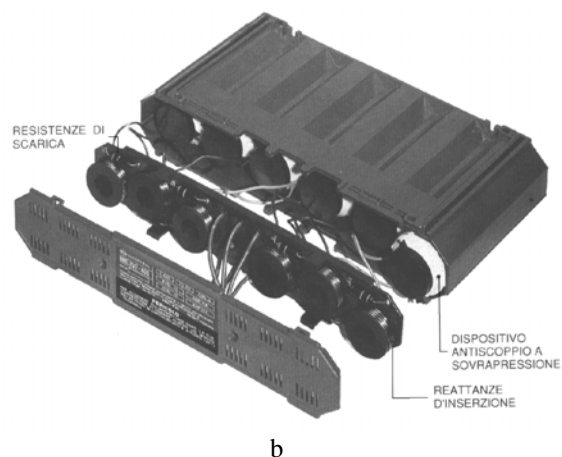
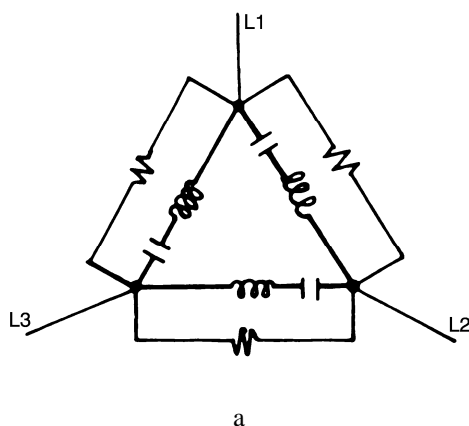


Fig. 4.68 - a) Schema elettrico interno di una batteria di condensatori di rifasamento trifase con resistenze di scarica, dispositivo antiscoppio a sovrappressione e reattanza di inserzione - b) Vista interna di una batteria di condensatori di rifasamento trifase (ELCONTROL).

Potenza nominale [kvar]	Tensione nominale [V]	Corrente nominale [A]	Tipo
2,5	230	6,5	Monofase
5	230	13	
10	230	25	
15	230	38	
20	230	50	
25	230	63	
1	400	1,5	Trifase
2	400	3	
3	400	4,5	
5	400	7	
10	400	14	
15	400	21	
20	400	29	
30	400	43	
40	400	58	
50	400	72	
5	550	5	
10	550	10	
15	550	15	
20	550	20	
30	550	30	
40	550	40	
50	550	50	

Tab. 4.49 - Esempi di valori commerciali delle batterie di condensatori funzionanti alla frequenza di 50 Hz.

Per quanto riguarda l'installazione e la manutenzione, di seguito vengono indicati alcuni punti da tenere in considerazione.

- I condensatori devono essere protetti dall'azione continuata di eventuali vapori acidi o comunque corrosivi.
- Le casse dei condensatori non vanno poste in diretto contatto con il pavimento del locale: è bene interporre spessori di distanziamento per favorire l'aerazione del fondo e diminuire così il pericolo di formazione di ruggine.
- Per le batterie composte da due o più unità, è necessario disporre le singole casse ad una distanza minima di 10 cm l'una dall'altra e dal muro.
- I conduttori di collegamento devono avere una sezione adeguata (vedere le tabelle fornite dai costruttori) ed i morsetti devono essere ben serrati.
- Le custodie metalliche devono essere collegate, mediante gli appositi morsetti, all'impianto di terra; inoltre, le parti in tensione non devono essere accessibili.
- I condensatori devono essere inseriti o disinseriti tramite interruttori o sezionatori di capacità adeguata.
- Prima di accedere ad un condensatore, si devono in ogni caso collegare in cortocircuito tra loro e a terra i relativi morsetti.

Attualmente, i costruttori propongono apparecchiature per il rifasamento automatico che facilitano l'installazione e la manutenzione, in quanto in un unico armadio sono presenti:

- un regolatore automatico per l'inserzione e la disinserzione dei condensatori al variare delle caratteristiche del carico;
- le apparecchiature di comando e protezione, come i contattori, i fusibili, gli interruttori automatici magnetotermici, ecc., con caratteristiche adeguate;
- i condensatori dotati di un dispositivo automatico che li scollega dalla rete in caso di sovrappressione interna, di resistenze di scarica atte a ridurre la tensione a valori imposti dalla Norma CEI 33-5 (per esempio, 75 V in 3 minuti); infine, induttanze di inserzione per la protezione contro le sovracorrenti di inserzione;
- i condensatori sono in genere realizzati utilizzando impregnanti non tossici.

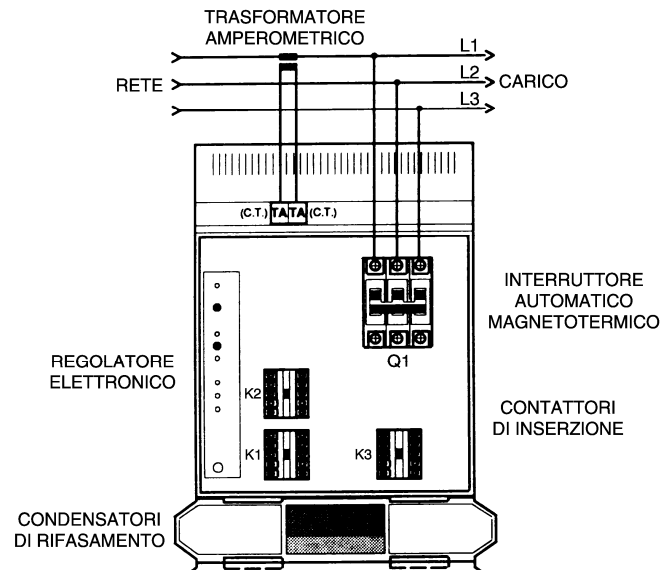


Fig. 4.69 - Esempio di batteria di condensatori autoregolata (ELCONTROL).

Il procedimento di scelta dell'interruttore con relative tarature degli sganciatori magnetotermici si imposta nel seguente modo:

- Q_n : potenza della batteria di condensatori, in kvar;
- U_n : tensione concatenata nominale della batteria di condensatori, in V.
 - 1) $I_n = Q_n / \sqrt{3} \cdot U_n$ corrente nominale della batteria di condensatori;
 - 2) $I_{ni} = 1,43 \cdot I_n$ corrente nominale dell'interruttore e/o valore di taratura dello sganciatore termico;
 - 3) $I_m \geq 9 \cdot I_{ni}$ valore di taratura dello sganciatore magnetico.

Dalla relazione numero (2) si comprende che ogni interruttore automatico può manovrare batterie di condensatori aventi una corrente nominale fino a $I_n / 1,43 = 0,7 \cdot I_{ni}$, cioè può essere utilizzato fino al 70% della corrente nominale dell'interruttore stesso.

La scelta del tipo di interruttore dovrà essere fatta tenendo conto anche del valore della corrente di cortocircuito presunta a valle dell'interruttore; quindi, a parità di corrente nominale, dovrà essere scelto un interruttore avente un adeguato potere di interruzione (i costruttori rendono disponibili apposite tabelle per facilitare la scelta del tipo di interruttore).