

Quaderni di applicazione tecnica N.8

Rifasamento e filtraggio delle armoniche negli impianti elettrici

Rifasamento e filtraggio delle armoniche negli impianti elettrici

Indice

Introduzione	2	8 Le armoniche negli impianti elettrici	
1 Generalità sul rifasamento	3	8.1 Le armoniche	20
2 Vantaggi tecnici del rifasamento	4	8.2 Prescrizioni normative.....	21
2.1 Migliore utilizzazione delle macchine elettriche	5	8.3 Gli effetti delle armoniche	21
2.2 Migliore utilizzazione delle condutture.....	5	8.3.1 Sovraccarichi.....	21
2.3 Riduzione delle perdite	6	8.3.2 Risonanza.....	22
2.4 Riduzione della caduta di tensione.....	6	8.4 Filtri per armoniche	23
3 Vantaggi economici del rifasamento	7	9 Manovra e protezione delle batterie di condensatori	
4 Mezzi di produzione della potenza reattiva		9.1 Fenomeni elettrici legati all'inserzione	25
4.1 Alternatori sincroni	8	9.2 Manovra e protezione	26
4.2 Compensatori sincroni.....	8	9.2.1 Scelta del dispositivo di protezione	26
4.3 Compensatori statici.....	8	9.2.2 Scelta del dispositivo di manovra (contattore).....	26
4.4 Batterie di condensatori statici	9	9.2.3 Scelta del condensatore.....	27
5 Tipi di rifasamento		9.2.4 Scarica dei condensatori.....	28
5.1 Rifasamento distribuito.....	10	10 Offerta ABB	
5.2 Rifasamento per gruppi	11	10.1 Interruttori	30
5.3 Rifasamento centralizzato.....	11	10.1.1 Interruttori scatolati Tmax T	30
5.4 Rifasamento misto	11	10.1.2 Interruttori scatolati SACE Tmax XT.....	32
5.5 Rifasamento automatico.....	11	10.1.3 Interruttori aperti Emax.....	34
6 Determinazione del fattore di potenza	12	10.2 Contattori.....	35
7 Determinazione della potenza reattiva necessaria	13	10.2.1 Contattori UA...RA	35
7.1 Rifasamento di motori trifase.....	14	10.2.2 Contattori UA.....	36
7.2 Rifasamento di trasformatori trifase.....	17	10.2.3 Contattori A e AF.....	36
		10.3 Compensatori automatici.....	37
		10.4 Filtri PQF	39
		Appendice A: Tabelle di scelta interruttori e contattori.....	44
		Appendice B: Potenza reattiva al variare della tensione.....	47
		Appendice C: Filtraggio e rifasamento in regime deformato	48
		Appendice D: Tensioni e correnti d'inserzione e scarica dei condensatori.....	53
		Appendice E: Rifasamento in un impianto fotovoltaico.....	55
		Appendice F: Armoniche nei sistemi trifase con neutro	56
		Glossario	58

Introduzione

Negli impianti elettrici, gli utilizzatori assorbono dalla rete potenza elettrica (attiva) quale fonte di energia di alimentazione (es. PC, stampanti, apparecchiature diagnostiche, ecc.) oppure la convertono in un'altra forma di energia (es. lampade o stufe elettriche) o in lavoro utile (es. motori elettrici). Affinché ciò avvenga è spesso necessario che l'utilizzatore scambi con la rete (con un consumo netto nullo) energia reattiva principalmente di tipo induttivo. Tale energia, pur non essendo direttamente convertita in altre forme, contribuisce ad incrementare la potenza totale transitante nella rete elettrica, dai generatori lungo tutte le condutture fino agli utilizzatori. Per attenuare tale effetto negativo viene effettuato il rifasamento degli impianti elettrici utilizzatori.

Il rifasamento, mediante l'utilizzo di batterie di condensatori per generare in loco l'energia reattiva necessaria per il trasferimento di potenza elettrica utile, consente quindi una gestione tecnico-economica migliore e più razionale degli impianti stessi.

Inoltre l'attuale diffusione di utilizzatori in corrente continua, quali circuiti elettronici e drives per azionamenti elettrici, comporta la generazione di armoniche di corrente che si riversano in rete, con il conseguente inquinamento e la distorsione delle forme d'onda su altri carichi allacciati. Pertanto, l'uso di filtri per armoniche sia passivi che attivi contribuisce a migliorare la power-quality complessiva della rete, effettuando anche il rifasamento alla frequenza di rete se tali filtri sono opportunamente dimensionati.

Il presente quaderno tecnico intende analizzare tali problematiche senza trattarne approfonditamente i dettagli tecnici, bensì, partendo dalla definizione di rifasamento, dall'analisi dei vantaggi tecnico-economici e descrivendo le forme ed i metodi di rifasamento, vuole condurre alla scelta appropriata dei dispositivi per il comando delle batterie di

condensatori e di filtraggio delle armoniche. Difatti, dopo una prima parte descrittiva, vengono fornite le offerte di ABB in termini di dispositivi per il rifasamento, intesi non solo come condensatori appropriati, ma anche come quei dispositivi atti a effettuare l'inserzione e la protezione delle batterie di condensatori stesse. Inoltre vengono fornite soluzioni per il filtraggio, sia in modo passivo che attivo, delle armoniche di corrente prodotte da carichi non lineari distorcenti.

A compendio del quaderno tecnico, sono altresì presenti sei appendici nelle quali vengono fornite:

- tabelle rapide per la scelta e coordinamento di interruttori e contattori per la manovra e la protezione di batterie di condensatori di una determinata potenza;
- indicazioni su come varia la potenza reattiva prodotta al variare della tensione di alimentazione e le considerazioni da effettuare al fine di non immettere potenza reattiva in rete;
- considerazioni sul rifasamento e filtraggio in regime deformato, per evidenziare come il rifasamento canonico porti di per sé ad una riduzione del valore delle armoniche presenti in rete;
- descrizioni degli andamenti di tensione e corrente durante l'inserzione e la scarica delle batterie di condensatori;
- considerazioni sul rifasamento in un impianto fotovoltaico;
- osservazioni sul contributo delle armoniche nella valutazione della corrente nel conduttore di neutro nei sistemi trifase.

1 Generalità sul rifasamento

Nei circuiti in corrente alternata la corrente assorbita da un carico può essere rappresentata da due componenti:

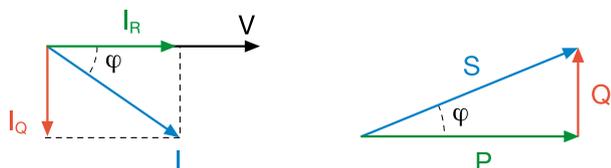
- la *componente attiva* I_R , in fase con la tensione di alimentazione, che è direttamente correlata al lavoro utile svolto (e quindi alla quota parte di energia elettrica trasformata in energia di altro tipo: meccanica, luminosa, termica...);
- la *componente reattiva* I_Q , in quadratura rispetto alla tensione, che serve per produrre il flusso necessario alla conversione delle potenze attraverso il campo elettrico o magnetico ed è un indice dello scambio energetico tra alimentazione ed utilizzatore. Senza tale componente non ci potrebbe essere trasferimento netto di potenza, ad esempio grazie all'accoppiamento magnetico nel nucleo di un trasformatore o nel traferro di un motore.

Nel caso più comune, in presenza di carichi di tipo ohmico-induttivo, la corrente totale I risulta sfasata in ritardo rispetto alla componente attiva I_R .

In un impianto elettrico utilizzatore occorre dunque generare e trasportare, oltre alla *potenza attiva utile* P , una certa *potenza reattiva* Q , indispensabile per la conversione dell'energia elettrica ma non fruibile dall'utilizzatore, poiché scambiata con la rete. Il complesso della potenza generata e trasportata costituisce la *potenza apparente* S .

Si definisce *fattore di potenza* $\cos\varphi$ il rapporto tra la componente attiva I_R ed il valore totale della corrente I ; φ è l'angolo di fase tra la tensione e la corrente. Ad una data tensione V di fase risulta:

$$\cos\varphi = \frac{I_R}{I} = \frac{P}{S}$$



La tabella 1.1 riporta i fattori di potenza tipici di alcune apparecchiature elettriche.

Tabella 1.1

Carico	$\cos\varphi$ fattore di potenza
Trasformatori a vuoto	0.1÷0.15
Motori	0.7÷0.85
Dispositivi per la lavorazione del metallo:	
- saldatrici ad arco	0.35÷0.6
- saldatrici ad arco compensate	0.7÷0.8
- saldatrici a resistenza	0.4÷0.6
- forni ad arco	0.75÷0.9
Lampade fluorescenti:	
- compensate	0.9
- non compensate	0.4÷0.6
Convertitori c.a. - c.c.	0.6÷0.95
Azionamenti c.c.	0.4÷0.75
Azionamenti c.a.	0.95÷0.97
Carichi resistivi	1

Rifasare significa agire per incrementare il fattore di potenza in una specifica sezione dell'impianto, fornendo localmente la potenza reattiva necessaria al fine di ridurre, a pari potenza utile richiesta, il valore della corrente e quindi della potenza transitante nella rete a monte. In questo modo, le linee, i generatori e i trasformatori possono essere dimensionati per un valore di potenza apparente inferiore, come verrà meglio espresso nel capitolo successivo.

Dal punto di vista strettamente tecnico, un impianto correttamente dimensionato può funzionare regolarmente anche in presenza di un basso fattore di potenza, per questo motivo non esistono norme che prescrivono il valore preciso del fattore di potenza che deve avere un impianto elettrico.

Effettuare il rifasamento rappresenta tuttavia una soluzione che consente di ottenere vantaggi tecnici ed economici; infatti, esercire un impianto con un basso $\cos\varphi$ comporta un incremento dei costi per il distributore di energia elettrica il quale, di conseguenza, applica un sistema di tariffe che penalizza il prelievo dell'energia con bassi fattori di potenza.

I provvedimenti legislativi esistenti nei vari paesi permettono agli enti distributori nazionali la creazione di un sistema di tariffe più o meno dettagliato; senza scendere nei particolari, tale sistema è strutturato in modo che l'energia reattiva assorbita in eccedenza a quella corrispondente ad un $\cos\varphi$ uguale a 0.9 deve essere pagata secondo determinati importi che dipendono dal livello di tensione della fornitura (bassa, media o alta) e dal fattore di potenza.

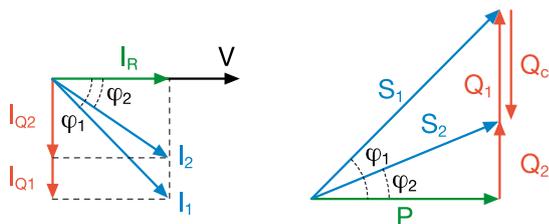
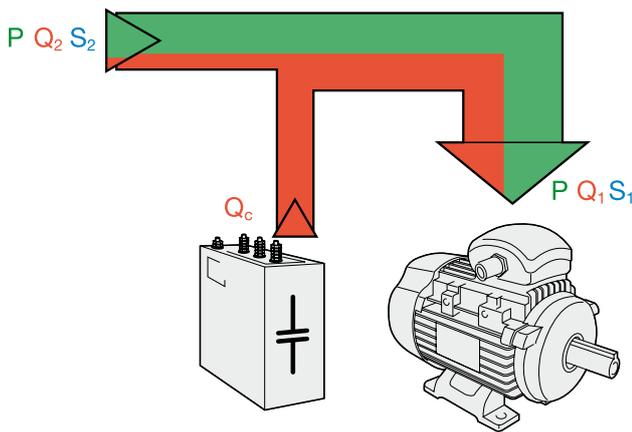
In base al sistema tariffario applicato, l'utilizzatore può determinare gli importi della propria maggiorazione e quindi è in grado di valutare, a fronte del costo di un impianto di rifasamento, il risparmio sul costo delle penali da pagare.

2 Vantaggi tecnici del rifasamento

Come precedentemente accennato, rifasando un impianto fornendo localmente la potenza reattiva necessaria si riduce, a pari potenza utile richiesta, il valore della corrente e quindi la potenza globale assorbita da monte; ciò comporta numerosi vantaggi tra i quali un migliore utilizzo delle macchine (generatori e trasformatori) e delle condutture (linee di trasmissione e distribuzione).

Nel caso di forme d'onda sinusoidali, la potenza reattiva necessaria per passare da un fattore di potenza $\cos\varphi_1$ ad un fattore di potenza $\cos\varphi_2$ è data dalla relazione (valida sia in trifase che in monofase):

$$Q_c = Q_1 - Q_2 = P \cdot (\operatorname{tg}\varphi_1 - \operatorname{tg}\varphi_2) \quad [2.1]$$



dove:

- P è la potenza attiva;
- Q_1, φ_1 sono la potenza reattiva e l'angolo di sfasamento prima del rifasamento;
- Q_2, φ_2 sono la potenza reattiva e l'angolo di sfasamento dopo il rifasamento;
- Q_c è la potenza reattiva di rifasamento.

Esempio

Si supponga di voler incrementare il fattore di potenza di un impianto trifase ($U_n = 400 \text{ V}$) che assorbe mediamente 300 kW da 0.8 a 0.93.

La corrente assorbita sarà pari a:

$$I_1 = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot \cos\varphi_1} = \frac{300 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0.8} = 540 \text{ A}$$

Applicando la formula precedentemente descritta si ottiene la potenza reattiva che deve essere prodotta localmente Q_c :

$$Q_c = P \cdot (\operatorname{tg}\varphi_1 - \operatorname{tg}\varphi_2) = 300 \cdot (0.75 - 0.39) = 108 \text{ kvar}$$

Per effetto del rifasamento la corrente assorbita passa da 540 A a:

$$I_2 = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot \cos\varphi_2} = \frac{300 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0.93} = 465 \text{ A}$$

(riduzione del 15% circa)

Per quanto detto, i vantaggi principali del rifasamento possono così riassumersi:

- migliore utilizzazione delle macchine elettriche;
- migliore utilizzazione delle condutture;
- riduzione delle perdite;
- riduzione della caduta di tensione.

2.1 Migliore utilizzazione delle macchine elettriche

I generatori ed i trasformatori sono dimensionati in base alla potenza apparente S . Essa, a parità di potenza attiva P , è tanto più piccola quanto minore è la potenza reattiva Q da erogare. Pertanto, rifasando l'impianto, le macchine possono essere dimensionate per una potenza apparente inferiore, pur fornendo la stessa potenza attiva.

A titolo di esempio, la tabella 2.1 mostra la variazione della potenza trasmissibile per trasformatori trifase M.T./b.t. in funzione del $\cos\varphi$ dell'utilizzatore.

Tabella 2.1

Potenza del trasformatore [kVA]	Potenza attiva trasmissibile [kW]					
	$\cos\varphi$					
	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
63	32	38	44	50	57	63
100	50	60	70	80	90	100
125	63	75	88	100	113	125
160	80	96	112	128	144	160
200	100	120	140	160	180	200
250	125	150	175	200	225	250
315	158	189	221	252	284	315
400	200	240	280	320	360	400
630	315	378	441	504	567	630
800	400	480	560	640	720	800
1000	500	600	700	800	900	1000
1250	625	750	875	1000	1125	1250

Dalla tabella precedente, se occorre alimentare una serie di carichi con una potenza complessiva di 170 kW con $\cos\varphi=0.7$, occorre utilizzare un trasformatore da 250 kVA. Se i carichi assorbissero la stessa potenza con $\cos\varphi=0.9$, anziché 0.7, sarebbe sufficiente utilizzare un trasformatore da 200 kVA.

Un discorso analogo può essere condotto per i generatori.

2.2 Migliore utilizzazione delle condutture

Rifasare permette di ottenere vantaggi anche per quanto riguarda il dimensionamento dei cavi. Infatti, come detto precedentemente, innalzando il fattore di potenza si riduce, a parità di potenza utile, la corrente.

Questa riduzione della corrente può essere tale da consentire la scelta di conduttori di sezione inferiore.

Per esplicitare ciò mediante un esempio pratico, si consideri un carico che richieda una potenza P_n pari a 170 kW con $\cos\varphi$ uguale a 0.7, alla tensione U_n di 400 V; la corrente assorbita $I_{0.7}$ sarà:

$$I_{0.7} = \frac{P_n}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot \cos\varphi_1} = \frac{170}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0.7} = 350.5 \text{ A}$$

Se si sceglie una tipologia di cavo unipolare in rame isolato in EPR e posato in piano su passerella perforata, nelle condizioni standard occorre utilizzare una sezione di 120 mm² (vedi tabella 2.2).

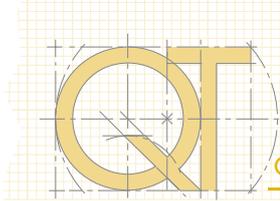
Effettuando localmente un rifasamento in modo da ottenere un valore del $\cos\varphi$ uguale a 0.9, la corrente richiesta sarà:

$$I_{0.9} = \frac{P_n}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot \cos\varphi_2} = \frac{170}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0.9} = 272.6 \text{ A}$$

Con tale valore di corrente il cavo può avere una sezione di 70 mm².

Tabella 2.2: portata I_0 dei cavi unipolari in rame su passerella perforata

S [mm ²]	Cu	
	XLPE/EPR	PVC
	I_0 [A]	
25	141	114
35	176	143
50	216	174
70	279	225
95	342	275
120	400	321
150	464	372
185	533	427
240	634	507
300	736	587
400	868	689
500	998	789
630	1151	905



2.3 Riduzione delle perdite

Le perdite di potenza in un conduttore elettrico dipendono dalla resistenza del conduttore stesso e dal quadrato della corrente che lo attraversa; dato che a parità di potenza attiva trasmessa, più alto è il $\cos\varphi$, più bassa è la corrente, ne consegue che al crescere del fattore di potenza diminuiscono le perdite nel conduttore posto a monte del punto in cui si effettua il rifasamento.

In un sistema trifase le perdite sono espresse nel seguente modo:

$$p = 3 \cdot R \cdot I^2 = R \cdot \frac{(P^2 + Q^2)}{U_n^2} \quad [2.2]$$

dato che:

$$I = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{\sqrt{(P^2 + Q^2)}}{\sqrt{3} \cdot U_n} \rightarrow 3 \cdot I^2 = \frac{(P^2 + Q^2)}{U_n^2} \quad [2.3]$$

dove:

- I è la corrente che attraversa il conduttore;
- R è la resistenza del conduttore;
- S è la potenza apparente richiesta dal carico;
- P è la potenza attiva richiesta dal carico;
- Q è la potenza reattiva richiesta dal carico;
- U_n è la tensione nominale di alimentazione.

La riduzione delle perdite Δp , una volta effettuato il rifasamento, è data da¹:

$$\Delta p = p_1 \cdot \left[1 - \left(\frac{\cos\varphi_1}{\cos\varphi_2} \right)^2 \right] \quad [2.4]$$

dove:

- p_1 sono le perdite prima del rifasamento
- $\cos\varphi_1$ è il fattore di potenza prima del rifasamento
- $\cos\varphi_2$ è il fattore di potenza dopo il rifasamento

Dalla formula si ricava che incrementando, ad esempio, il fattore di potenza da 0.7 a 0.9 si ottiene un risparmio sulle perdite del 39.5% circa. La tabella 2.3 riporta il risparmio sulle perdite incrementando il fattore di potenza da un valore iniziale $\cos\varphi_1$ a un valore finale 0.9 e 0.95.

Tabella 2.3

	$\cos\varphi_1$						
	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	0.95
$\Delta p\%$ da $\cos\varphi_1$ a 0.9	80.2	69.1	55.6	39.5	20.9	-	-
$\Delta p\%$ da $\cos\varphi_1$ a 0.95	82.3	72.3	60.1	45.7	29.1	10.2	-

Rifasando si ha una riduzione delle perdite di potenza in tutte le parti dell'impianto poste a monte del punto in cui si effettua il rifasamento.

¹
 $p_1 = R \cdot \frac{(P^2 + Q^2)}{U_n^2} = \frac{R}{U_n^2} \cdot S^2 = \frac{R}{U_n^2} \cdot \frac{P^2}{(\cos\varphi_1)^2}$ $p_2 = \frac{R}{U_n^2} \cdot \frac{P^2}{(\cos\varphi_2)^2}$
 $\Delta p = p_1 - p_2 = \frac{R}{U_n^2} \cdot \frac{P^2}{\cos\varphi_1} - \frac{R}{U_n^2} \cdot \frac{P^2}{\cos\varphi_2} = p_1 \cdot \left[1 - \left(\frac{\cos\varphi_1}{\cos\varphi_2} \right)^2 \right]$

2.4 Riduzione della caduta di tensione

La caduta di tensione concatenata in una linea trifase può essere espressa nel seguente modo:

$$\Delta U = \sqrt{3} \cdot I \cdot (R \cos\varphi + X \sin\varphi) = \frac{P}{U_n} \cdot (R + X \operatorname{tg}\varphi) \quad [2.5]$$

dove:

- R e X sono rispettivamente la resistenza e la reattanza della linea;
- P è la potenza attiva trasmessa;
- I è la corrente;
- U_n è la tensione nominale.

A parità di potenza attiva trasmessa la caduta di tensione sarà tanto più piccola quanto più grande sarà il fattore di potenza².

Come si può notare nelle figure seguenti, nelle quali sono riportati i diagrammi della caduta di tensione di fase ΔV , la variazione di tensione stessa è tanto minore quanto (a parità della componente attiva di corrente di carico e quindi della potenza attiva) minore è l'angolo φ di sfasamento tra tensione e corrente; inoltre, tale variazione è minima se non vi è alcun assorbimento di potenza reattiva (corrente in fase)³.

Figura 2.1: diagramma dei fasori senza rifasamento per la visualizzazione della caduta di tensione di linea

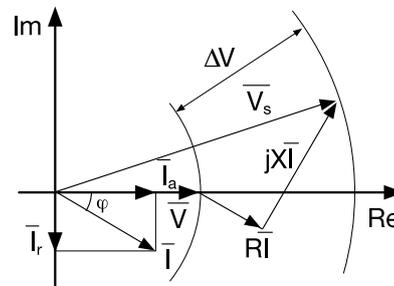
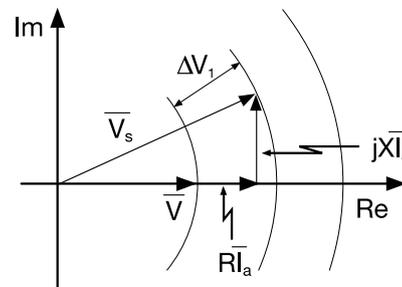


Figura 2.2: il diagramma dei fasori con rifasamento totale per la visualizzazione della caduta di tensione sulla linea quando il carico è puramente ohmico



² Nelle linee di trasmissione ad altissima tensione, essendo progettate in modo che la potenza da esse trasportata sia uguale alla potenza caratteristica, la variazione di tensione è già di per sé molto limitata (nulla se si assume la linea senza perdite) ed inoltre il consumo di potenza reattiva induttiva dovuto al passaggio di corrente nell'induttanza serie è esattamente bilanciato dalla produzione di potenza reattiva capacitiva che ha luogo nelle capacità derivate.

³ Per definizione e come si può notare dai grafici, la caduta di tensione è la differenza tra i moduli della tensione di partenza e di arrivo. Nel calcolo della ΔV con la formula [2.5] non viene indicato un termine aggiuntivo pari a circa 1/200 del valore di tensione, che pertanto può essere trascurato.

3 Vantaggi economici del rifasamento

I distributori di energia elettrica applicano un sistema di tariffe che penalizza il prelievo dell'energia con un fattore di potenza medio mensile inferiore a 0.9.

I contratti applicati sono differenti da paese a paese e possono variare anche in relazione alla tipologia del cliente: di conseguenza i discorsi che seguiranno sono da considerarsi a puro titolo didattico ed indicativo, al fine di mostrare il risparmio economico che si ottiene con il rifasamento.

In linea generale, le clausole contrattuali di fornitura di energia richiedono il pagamento dell'energia reattiva prelevata se il fattore di potenza è compreso tra 0.7 e 0.9, mentre non è dovuto alcun pagamento se è superiore a 0.9.

Per $\cos\varphi < 0.7$ i distributori di energia possono obbligare l'utente al rifasamento.

Si noti che avere un fattore di potenza medio mensile superiore o uguale a 0.9, significa richiedere alla rete energia reattiva inferiore o uguale al 50% dell'energia attiva:

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{Q}{P} \leq 0.5 \rightarrow \cos\varphi \geq 0.89 \quad [3.1]$$

Quindi non si applicano penali se il fabbisogno di energia reattiva non supera il 50% di quella attiva.

Il costo su base annua che l'utente sostiene prelevando l'energia reattiva in eccedenza a quella corrispondente ad un fattore di potenza pari a 0.9 può essere espresso nel seguente modo:

$$C_{EQ} = (E_Q - 0.5 \cdot E_P) \cdot c \quad [3.2]$$

dove:

- C_{EQ} è il costo dell'energia reattiva in un anno in €;
- E_Q è l'energia reattiva consumata in un anno in kvarh;
- E_P è l'energia attiva consumata in un anno in kWh;
- $E_Q - 0.5 \cdot E_P$ è la quota di energia reattiva soggetta al costo;
- c è il costo unitario dell'energia reattiva in €/kvarh.

Se si rifasa a 0.9, per non pagare il consumo di energia reattiva, il costo della batteria di condensatori e della loro installazione è:

$$C_{Qc} = Q_c \cdot c_c \quad [3.3]$$

dove:

- C_{Qc} è il costo annuo in € per avere un fattore di potenza pari a 0.9;
- Q_c è la potenza della batteria di condensatori necessaria a portare il $\cos\varphi$ a 0.9, in kvar;
- c_c è il costo impianto annuo della batteria di condensatori in €/kvar;

Il risparmio per l'utente sarà:

$$C_{EQ} - C_{Qc} = (E_Q - 0.5 \cdot E_P) \cdot c - Q_c \cdot c_c \quad [3.4]$$

Occorre notare che la batteria di condensatori rappresenta un "costo impianto" che va ripartito opportunamente negli anni di vita dell'impianto stesso tramite uno o più coefficienti economici; nella pratica accade che il risparmio che si ottiene rifasando consente di recuperare il costo dell'impianto della batteria di condensatori entro i primi anni di utilizzo.

In realtà, un'analisi di un investimento accurata prevede l'uso di alcuni parametri economici che esulano dagli obiettivi di questo quaderno tecnico.

Esempio

Un'azienda assorbe energia attiva e reattiva secondo la tabella 3.1:

Tabella 3.1

Mese	energia attiva [kWh]	energia reattiva [kvarh]	fdp medio mensile
Gen	7221	6119	0.76
Feb	8664	5802	0.83
Mar	5306	3858	0.81
Apr	8312	6375	0.79
Mag	5000	3948	0.78
Giu	9896	8966	0.74
Lug	10800	10001	0.73
Ago	9170	8910	0.72
Set	5339	4558	0.76
Ott	7560	6119	0.78
Nov	9700	8870	0.74
Dic	6778	5879	0.76
Totale	93746	79405	-

Ipotizzando un costo unitario dell'energia reattiva pari a 0.0421 €/kvarh, il costo totale annuo sarà:

$$C_{EQ} = (E_Q - 0.5 \cdot E_P) \cdot c = (79405 - 0.5 \cdot 93746) \cdot 0.0421 = 1370 \text{ €}$$

La tabella 3.2 mostra la potenza reattiva necessaria ad elevare il fattore di potenza a 0.9

Tabella 3.2

Mese	energia attiva [kWh]	fdp medio mensile	ore funzionamento	potenza attiva P [kW]	$Q_c = P \cdot (\operatorname{tg}\varphi - 0.484^1)$
Gen	7221	0.76	160	45.1	16.4
Feb	8664	0.83	160	54.2	10.0
Mar	5306	0.81	160	33.2	8.1
Apr	8312	0.79	160	52.0	14.7
Mag	5000	0.78	160	31.3	9.5
Giu	9896	0.74	160	61.9	26.1
Lug	10800	0.73	160	67.5	29.8
Ago	9170	0.72	160	57.3	27.9
Set	5339	0.76	160	33.4	12.3
Ott	7560	0.78	160	47.3	15.4
Nov	9700	0.74	160	60.6	26.1
Dic	6778	0.76	160	42.4	16.2

¹ 0.484 è la tangente corrispondente al $\cos\varphi$ pari a 0.9

Se si sceglie una batteria automatica di rifasamento di potenza $Q_c = 30$ kvar con un costo comprensivo di installazione annuo c_c di 25 €/kvar si ottiene un costo complessivo di 750 €. Il risparmio per l'utente non tenendo in conto l'ammortamento e gli oneri finanziari sarà:

$$C_{EQ} - C_{Qc} = 1370 - 750 = 620 \text{ €}$$

4 Mezzi di produzione della potenza reattiva

I principali mezzi per la produzione di potenza reattiva sono:

- alternatori sincroni;
- compensatori sincroni;
- compensatori statici;
- batterie di condensatori statici.

4.1 Alternatori sincroni

Gli alternatori sincroni sono le principali macchine elettriche utilizzate per la generazione di energia elettrica. Il loro scopo è quello di fornire potenza elettrica alle utenze finali attraverso i sistemi di trasmissione e di distribuzione. Inoltre, senza scendere in dettagli tecnici, agendo sull'eccitazione dell'alternatore è possibile variare il valore della tensione generata e quindi regolare le iniezioni di potenza reattiva in rete, allo scopo di migliorare i profili di tensione del sistema e ridurre le perdite per effetto joule lungo le linee.

4.2 Compensatori sincroni

Sono motori sincroni funzionanti a vuoto, posti in sincronismo con la rete ed aventi la sola funzione di assorbire la potenza reattiva in esubero (*funzionamento in sottoeccitazione*) oppure di fornire quella mancante (*funzionamento in sovraccitazione*).

Figura 4.1: compensatore sincrono in sovraccitazione

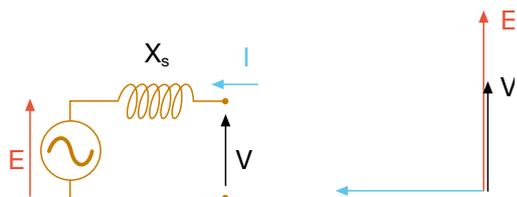
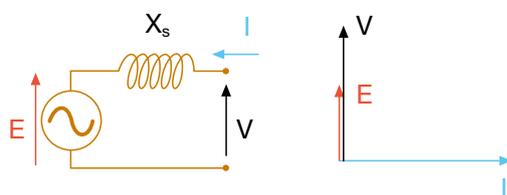


Figura 4.2: compensatore sincrono in sottoeccitazione



E : f.e.m. indotta nelle fasi di statore
 V : tensione di fase imposta dalla rete ai morsetti dell'alternatore
 I : corrente di statore
 X_s : reattanza di statore

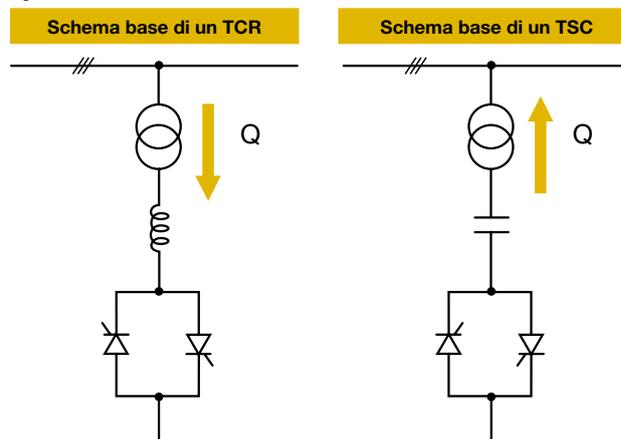
Questi dispositivi sono principalmente utilizzati in determinati nodi della rete di trasmissione e subtrasmissione per la regolazione della tensione e dei flussi di potenza reattiva.

Nelle reti di distribuzione non risulta economicamente conveniente l'uso di compensatori sincroni visti i loro alti costi di installazione e manutenzione.

4.3 Compensatori statici

Il notevole sviluppo dell'elettronica di potenza, sta favorendo la sostituzione dei compensatori sincroni con dei sistemi statici per il controllo della potenza reattiva quali ad esempio, i TSC (*thyristor switched capacitors*) e i TCR (*thyristor controlled reactors*), una versione elettronica dei sistemi di compensazione dell'energia reattiva basati su componenti elettromeccanici nei quali, però, l'inserzione dei vari condensatori non avviene attraverso l'apertura e la chiusura di opportuni contattori, ma attraverso il controllo fornito da coppie di tiristori in antiparallelo.

Figura 4.3



I TSC consentono un controllo a gradini della potenza reattiva erogata dai gruppi di condensatori, mentre, con i TCR, si può controllare con continuità la potenza reattiva assorbita dalle induttanze.

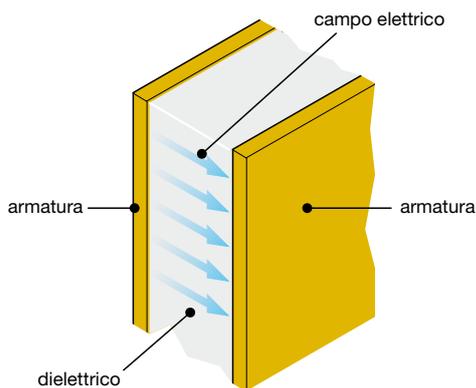
Accoppiando un TSC ed un TCR è possibile una regolazione modulata con continuità di potenza reattiva prodotta/assorbita.

Dal punto di vista applicativo questi dispositivi sono impiegati soprattutto su reti ad alta e altissima tensione.

4.4 Batterie di condensatori statici

Il condensatore è un bipolo passivo costituito da due superfici conduttrici, dette armature, fra le quali è interposto un materiale dielettrico.

Figura 4.4



Il sistema che si ottiene viene impregnato per impedire la penetrazione di umidità o bolle d'aria che potrebbero dare luogo a scariche elettriche.

I condensatori di ultima generazione sono del tipo a secco e subiscono un trattamento specifico che ne migliora le caratteristiche elettriche.

I condensatori a secco non presentano il rischio di inquinamento per l'eventuale perdita della sostanza impregnante.

In base alla geometria delle armature metalliche, si possono avere:

- condensatori piani;
- condensatori cilindrici;
- condensatori sferici.

Le principali grandezze che caratterizzano un condensatore sono:

- la *capacità nominale* C_n : il valore della capacità ottenuto dai valori nominali della potenza, della tensione e della frequenza del condensatore;
- la *potenza nominale* Q_n : la potenza reattiva per la quale il condensatore è stato progettato;
- la *tensione nominale* U_n : il valore efficace della tensione alternata per la quale il condensatore è stato progettato;
- la *frequenza nominale* f_n : la frequenza per la quale il condensatore è stato progettato.

Applicando una tensione alternata fra le armature, il condensatore è sottoposto a cicli di carica e scarica, durante i quali immagazzina energia reattiva (carica del condensatore) e la inietta nel circuito al quale è collegato (scarica del condensatore).

Tale energia è data dalla relazione:

$$E_c = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2$$

dove:

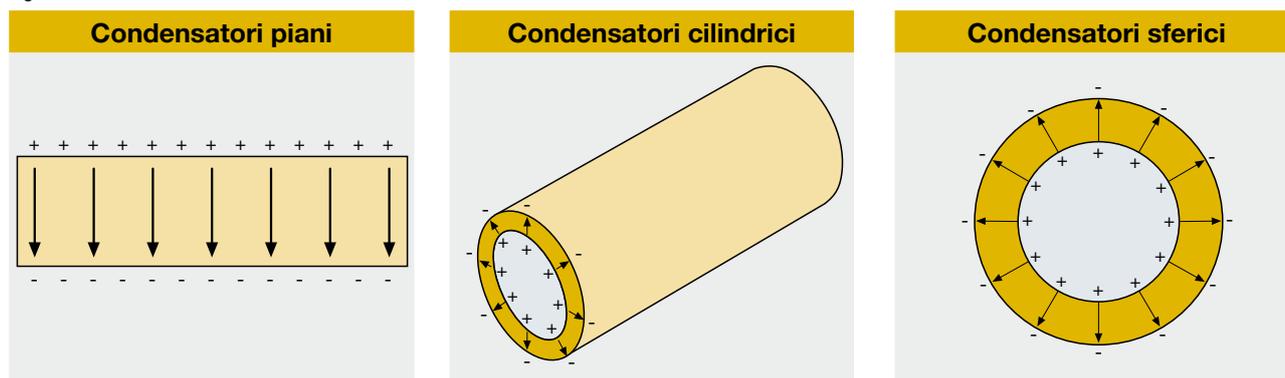
- C è la capacità del condensatore;
- U è la tensione applicata ai capi del condensatore.

Vista la sua capacità di immagazzinare ed erogare energia, il condensatore è utilizzato come elemento base per la realizzazione delle batterie di rifasamento (a tutti i livelli di tensione) e dei dispositivi statici di regolazione della potenza reattiva¹.

In particolare i condensatori di rifasamento utilizzati in bassa tensione sono costituiti da elementi monofase realizzati in film di polipropilene metallizzato e possono essere di tipo autorigenerabili. Nei condensatori di questo tipo la parte di dielettrico danneggiata da una scarica è in grado di rigenerarsi; infatti al presentarsi di tali situazioni la parte del film di polipropilene interessata dalla scarica evapora per l'effetto termico causato dalla scarica stessa, ripristinando in questo modo la parte danneggiata.

¹ Nella realtà i condensatori assorbono una seppur minima potenza attiva a causa della conduttività non nulla del dielettrico interposto ed alle perdite per isteresi dielettrica.

Figura 4.5



5 Tipi di rifasamento

Nei capitoli precedenti si è visto quali sono i vantaggi tecnici ed economici del rifasamento.

Occorre quindi capire qual è il punto in cui vanno installati i condensatori in modo da sfruttare al meglio tali vantaggi.

Non esistono regole valide per ogni tipo di impianto e in teoria i condensatori possono essere installati in qualsiasi punto, ma occorre valutarne la realizzazione pratica ed economica.

In base alle modalità di ubicazione dei condensatori i principali metodi di rifasamento sono:

- rifasamento distribuito;
- rifasamento per gruppi;
- rifasamento centralizzato;
- rifasamento misto;
- rifasamento automatico.

5.1 Rifasamento distribuito

Il rifasamento distribuito si realizza collegando una batteria di condensatori opportunamente dimensionata direttamente ai terminali del dispositivo utilizzatore che necessita di potenza reattiva.

L'installazione è semplice e poco costosa: condensatore e carico possono usufruire delle stesse protezioni contro

le sovracorrenti e sono inseriti e disinseriti contemporaneamente.

Questo tipo di rifasamento è consigliabile nel caso di grossi utilizzatori con carico e fattore di potenza costanti e tempi di connessione lunghi ed è solitamente utilizzato per i motori e le lampade a fluorescenza.

Gli schemi usuali di connessione per il rifasamento di motori sono rappresentati nella figura 5.1.

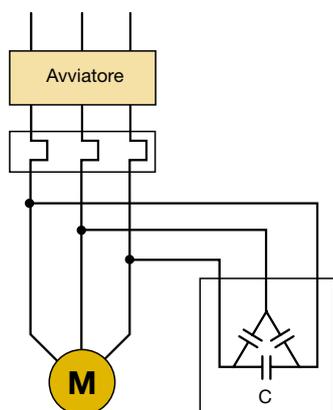
Nel caso di connessione diretta (schemi 1 e 2) si corre il rischio che, dopo la disalimentazione, lo stesso motore continuando a ruotare (energia cinetica residua) e auto-eccitandosi con l'energia reattiva fornita dalla batteria di condensatori, si trasformi in un generatore asincrono. In tal caso viene mantenuta la tensione sul lato carico del dispositivo di manovra e controllo, con il rischio di pericolose sovratensioni (fino al doppio della tensione nominale).

Nel caso in cui invece si utilizzi lo schema 3 si procede connettendo la batteria di rifasamento solo a motore avviato e disconnettendo la stessa in anticipo rispetto alla disalimentazione del motore.

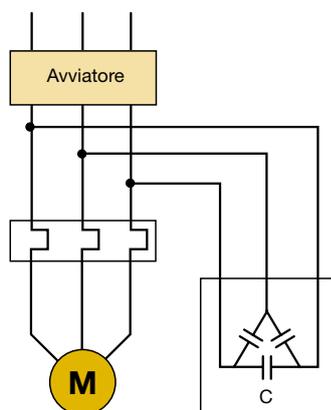
Con questo tipo di rifasamento tutta la rete a monte del carico lavora con un fattore di potenza elevato; per contro tale soluzione risulta onerosa economicamente.

Figura 5.1

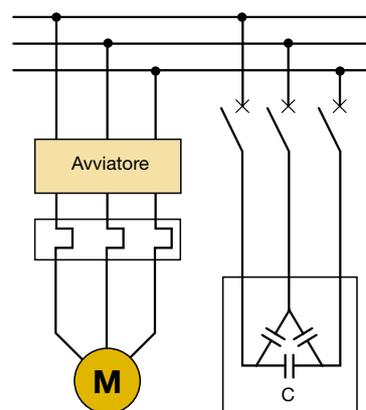
Schema 1



Schema 2



Schema 3

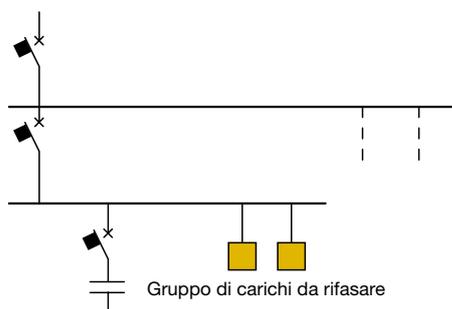


5.2 Rifasamento per gruppi

Consiste nel rifasare localmente gruppi di carichi con caratteristiche di funzionamento simili installando una batteria di condensatori dedicata.

È il metodo che raggiunge un compromesso tra la soluzione economica e il corretto esercizio dell'impianto in quanto i benefici del rifasamento saranno sentiti solo dalla linea a monte del punto in cui è installata la batteria di condensatori.

Figura 5.2



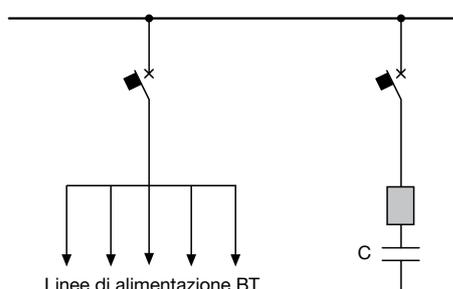
5.3 Rifasamento centralizzato

L'andamento giornaliero dei carichi ha un'importanza fondamentale per la scelta del tipo di rifasamento più conveniente.

In impianti con molti carichi, in cui non tutte le utenze funzionano contemporaneamente e/o in cui alcuni utilizzatori sono connessi solo poche ore al giorno, è evidente che la soluzione del rifasamento distribuito diventa troppo onerosa rimanendo per lungo tempo inutilizzati molti dei condensatori installati.

Pertanto, l'utilizzo di un unico sistema di rifasamento all'origine dell'impianto permette di ridurre notevolmente la potenza complessiva dei condensatori installati.

Figura 5.3



Nel rifasamento centralizzato sono impiegati normalmente complessi automatici (vedi più avanti rifasamento automatico) con batterie frazionate in più gradini, installati direttamente nei quadri principali di distribuzione; l'utilizzo di una batteria connessa permanentemente è possibile solo se l'assorbimento di energia reattiva è abbastanza regolare durante la giornata.

La soluzione centralizzata consente di ottimizzare i costi della batteria di condensatori, ma presenta lo svantaggio che le linee di distribuzione dell'impianto, a valle del dispositivo di rifasamento, devono essere dimensionate tenendo conto della piena potenza reattiva assorbita dai carichi.

5.4 Rifasamento misto

Questa soluzione deriva da un compromesso fra le due soluzioni del rifasamento distribuito e di quello centralizzato e ne sfrutta i vantaggi. In questo modo si utilizza il rifasamento distribuito per gli apparecchi utilizzatori di maggior potenza e quello centralizzato per la restante parte.

Il rifasamento misto è prevalentemente impiegato quando in un impianto solo le grosse apparecchiature sono utilizzate frequentemente; in tale circostanza essi sono rifasati singolarmente mentre le piccole apparecchiature sono rifasate in modo centralizzato.

5.5 Rifasamento automatico

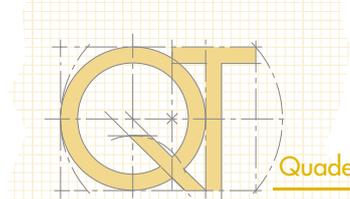
Nella maggiore parte degli impianti non si ha un assorbimento costante di potenza reattiva ad esempio a causa di cicli di lavoro in cui si utilizzano macchine con diverse caratteristiche elettriche.

In tali impianti sono impiegati sistemi di rifasamento automatici che, per mezzo di un sistema di rilevamento di tipo varmetrico e di un regolatore di fattore di potenza, permettono l'inserzione o la disinserzione automatica di diverse batterie di condensatori, seguendo in tal modo le variazioni della potenza reattiva assorbita e mantenendo costante il fattore di potenza dell'impianto.

Un sistema di rifasamento automatico è composto da:

- dei sensori che prelevano i segnali di corrente e tensione;
- un'unità intelligente che confronta il fattore di potenza misurato con quello desiderato e provvede alla inserzione e disinserzione di batterie di condensatori della potenza reattiva necessaria (regolatore del fattore di potenza);
- un quadro elettrico di potenza che comprende i dispositivi di protezione e manovra;
- delle batterie di condensatori.

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.



6 Determinazione del fattore di potenza

Per dimensionare la batteria di condensatori da installare per rifasare l'impianto occorre determinare in maniera precisa il fattore di potenza in base ai consumi o al ciclo di carico dell'impianto; ciò per evitare di immettere energia reattiva in eccesso, condizione normalmente non permessa dagli enti distributori di energia elettrica.

Se si desidera effettuare un rifasamento di tipo distribuito o per gruppi occorre determinare il $\cos\varphi$ del singolo carico o del gruppo di carichi (reparto); ciò può essere fatto nei seguenti modi:

- direttamente, mediante misura diretta tramite un cosfmetro;
- indirettamente, attraverso la lettura dei contatori di energia attiva e reattiva.

Il *cosfmetro* è uno strumento di misura in grado di visualizzare il fattore di potenza $\cos\varphi$ con il quale il carico sta assorbendo energia. La lettura dello strumento andrà fatta in diversi momenti del ciclo di carico in modo da poter ricavare un fattore di potenza medio.

Se si hanno a disposizione le letture di energia attiva e reattiva assorbite in un ciclo di lavoro dal carico o dall'insieme di carichi che costituiscono il reparto, il fattore di potenza medio può essere calcolato nel seguente modo:

$$\cos\varphi = \cos \left(\operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{E_{Qf} - E_{Qi}}{E_{Pf} - E_{Pi}} \right) \right)$$

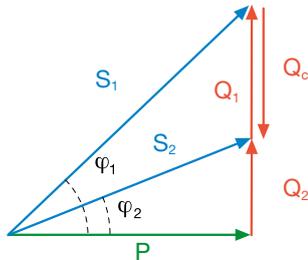
dove:

- E_{Pi} e E_{Qi} sono i valori dell'energia attiva e reattiva letti all'inizio del ciclo di lavoro;
- E_{Pf} e E_{Qf} sono i valori dell'energia attiva e reattiva letti alla fine del ciclo di lavoro.

Se si vuole effettuare un rifasamento centralizzato il fattore di potenza medio mensile può essere ricavato come illustrato precedentemente oppure direttamente dalle bollette dell'ente fornitore di energia.

7 Determinazione della potenza reattiva necessaria

Noto il fattore di potenza dell'impianto ($\cos\varphi_1$) e quello che si vuole ottenere ($\cos\varphi_2$) è possibile determinare la potenza reattiva necessaria della batteria di condensatori per ottenere il rifasamento.



Se si indica con:

- P la potenza attiva installata
- φ_1 l'angolo di sfasamento prima del rifasamento
- φ_2 l'angolo di sfasamento che si vuole ottenere con il rifasamento

la potenza della batteria di condensatori Q_c vale:

$$Q_c = (\operatorname{tg}\varphi_1 - \operatorname{tg}\varphi_2) \cdot P = K \cdot P \quad [7.1]$$

La tabella 7.1 permette di calcolare, dato il $\cos\varphi$ di partenza, la potenza della batteria di condensatori in kvar per kW installato necessaria per ottenere un determinato fattore di potenza.

In un sistema trifase la batteria di condensatori dimensionata, costituita da tre condensatori di uguale valore di capacità, può essere collegata a triangolo oppure a stella. Nella scelta della modalità di collegamento, occorre tener presente che nel collegamento a triangolo ciascuna capacità è soggetta alla tensione concatenata di alimentazione, ma, a parità di potenza reattiva generata, ha un valore pari ad un terzo di quello che avrebbe nel collegamento a stella¹:

$$Q_{cY} = Q_{c\Delta} \rightarrow C_Y = 3 \cdot C_{\Delta} \quad [7.2]$$

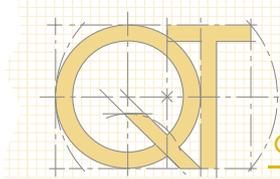
In bassa tensione, dove le problematiche di isolamento sono meno preponderanti, si preferisce usualmente impiegare il collegamento a triangolo della batteria di condensatori, consentendo un dimensionamento inferiore delle capacità di ciascuna fase.

$$Q_{cY} = 3 \cdot \omega \cdot C_Y \cdot \left(\frac{U_n}{\sqrt{3}}\right)^2 = \omega \cdot C_Y \cdot U_n^2 = Q_{c\Delta} = 3 \cdot \omega \cdot C_{\Delta} \cdot U_n^2 \rightarrow C_Y = 3 \cdot C_{\Delta}$$

Tabella 7.1

Fattore K (kvar/kW)

cos φ iniziale	cos φ finale												
	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
0.60	0.583	0.714	0.849	0.878	0.907	0.938	0.970	1.005	1.042	1.083	1.130	1.191	1.333
0.61	0.549	0.679	0.815	0.843	0.873	0.904	0.936	0.970	1.007	1.048	1.096	1.157	1.299
0.62	0.515	0.646	0.781	0.810	0.839	0.870	0.903	0.937	0.974	1.015	1.062	1.123	1.265
0.63	0.483	0.613	0.748	0.777	0.807	0.837	0.870	0.904	0.941	0.982	1.030	1.090	1.233
0.64	0.451	0.581	0.716	0.745	0.775	0.805	0.838	0.872	0.909	0.950	0.998	1.058	1.201
0.65	0.419	0.549	0.685	0.714	0.743	0.774	0.806	0.840	0.877	0.919	0.966	1.027	1.169
0.66	0.388	0.519	0.654	0.683	0.712	0.743	0.775	0.810	0.847	0.888	0.935	0.996	1.138
0.67	0.358	0.488	0.624	0.652	0.682	0.713	0.745	0.779	0.816	0.857	0.905	0.966	1.108
0.68	0.328	0.459	0.594	0.623	0.652	0.683	0.715	0.750	0.787	0.828	0.875	0.936	1.078
0.69	0.299	0.429	0.565	0.593	0.623	0.654	0.686	0.720	0.757	0.798	0.846	0.907	1.049
0.70	0.270	0.400	0.536	0.565	0.594	0.625	0.657	0.692	0.729	0.770	0.817	0.878	1.020
0.71	0.242	0.372	0.508	0.536	0.566	0.597	0.629	0.663	0.700	0.741	0.789	0.849	0.992
0.72	0.214	0.344	0.480	0.508	0.538	0.569	0.601	0.635	0.672	0.713	0.761	0.821	0.964
0.73	0.186	0.316	0.452	0.481	0.510	0.541	0.573	0.608	0.645	0.686	0.733	0.794	0.936
0.74	0.159	0.289	0.425	0.453	0.483	0.514	0.546	0.580	0.617	0.658	0.706	0.766	0.909
0.75	0.132	0.262	0.398	0.426	0.456	0.487	0.519	0.553	0.590	0.631	0.679	0.739	0.882
0.76	0.105	0.235	0.371	0.400	0.429	0.460	0.492	0.526	0.563	0.605	0.652	0.713	0.855
0.77	0.079	0.209	0.344	0.373	0.403	0.433	0.466	0.500	0.537	0.578	0.626	0.686	0.829
0.78	0.052	0.183	0.318	0.347	0.376	0.407	0.439	0.474	0.511	0.552	0.599	0.660	0.802
0.79	0.026	0.156	0.292	0.320	0.350	0.381	0.413	0.447	0.484	0.525	0.573	0.634	0.776
0.80		0.130	0.266	0.294	0.324	0.355	0.387	0.421	0.458	0.499	0.547	0.608	0.750
0.81		0.104	0.240	0.268	0.298	0.329	0.361	0.395	0.432	0.473	0.521	0.581	0.724
0.82		0.078	0.214	0.242	0.272	0.303	0.335	0.369	0.406	0.447	0.495	0.556	0.698
0.83		0.052	0.188	0.216	0.246	0.277	0.309	0.343	0.380	0.421	0.469	0.530	0.672
0.84		0.026	0.162	0.190	0.220	0.251	0.283	0.317	0.354	0.395	0.443	0.503	0.646
0.85			0.135	0.164	0.194	0.225	0.257	0.291	0.328	0.369	0.417	0.477	0.620
0.86			0.109	0.138	0.167	0.198	0.230	0.265	0.302	0.343	0.390	0.451	0.593
0.87			0.082	0.111	0.141	0.172	0.204	0.238	0.275	0.316	0.364	0.424	0.567
0.88			0.055	0.084	0.114	0.145	0.177	0.211	0.248	0.289	0.337	0.397	0.540
0.89			0.028	0.057	0.086	0.117	0.149	0.184	0.221	0.262	0.309	0.370	0.512
0.90				0.029	0.058	0.089	0.121	0.156	0.193	0.234	0.281	0.342	0.484



Esempio

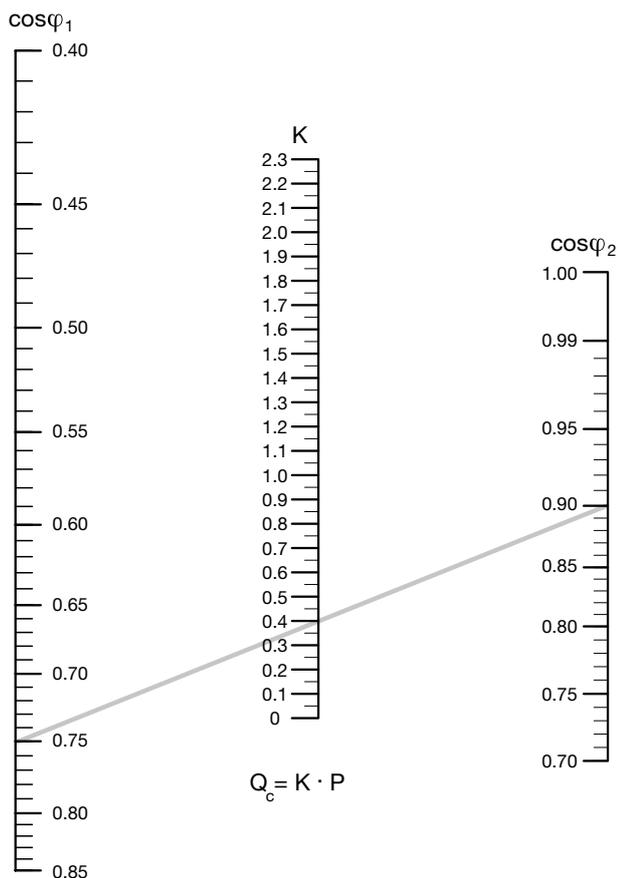
In un impianto di potenza attiva pari a 300 kW a 400 V con $\cos\varphi$ di 0.75, si vuole aumentare il fattore di potenza a 0.90. Dalla tabella 7.1, dall'intersezione della riga "cosφ iniziale" 0.75 con la colonna "cosφ finale" 0.9 si ricava un coefficiente K pari a 0.398.

Occorre quindi una batteria di condensatori di potenza Q_c pari a:

$$Q_c = K \cdot P = 0.398 \cdot 300 = 119.4 \text{ kvar}$$

Il fattore K può anche essere determinato tramite il nomogramma seguente².

Figura 7.1: nomogramma per la determinazione della potenza di rifasamento



² Come evidenziato nella figura, si traccia un segmento di linea retta tra il valore del $\cos\varphi$ di partenza e quello che si vuole ottenere. L'intersezione della linea sulla scala graduata centrale, fornisce il valore K che moltiplicato per la potenza attiva P del carico determina la potenza reattiva necessaria Q_c .

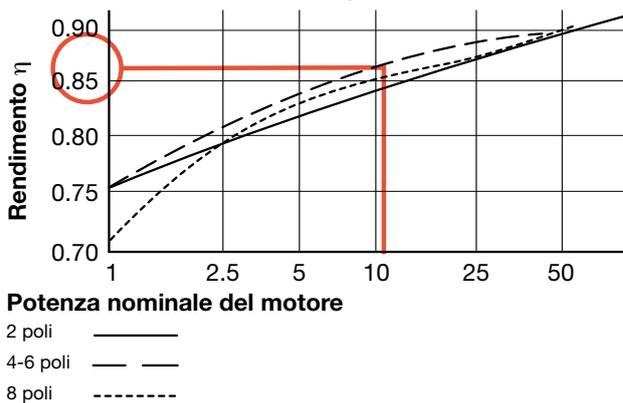
7.1 Rifasamento di motori trifase

Il rifasamento dei motori asincroni non può essere dimensionato con grande precisione poiché il fattore di potenza è fortemente influenzato dalle condizioni di carico. Infatti, supponendo di aver un motore da 11 kW a 6 poli, dalla tabella e dal diagramma sottostanti si ricava che il fattore di potenza in condizioni nominali risulta pari a $\cos\varphi_n = 0.77$, mentre il rendimento nominale $\eta_n \approx 0.86$.

Tabella 7.2

Potenza nominale		Numero di poli			
kW	HP	2	4	6	8
1.1	1.5	0.85	0.79	0.75	0.75
1.5	2	0.85	0.79	0.75	0.75
2.2	3	0.85	0.79	0.75	0.75
3	4	0.86	0.80	0.75	0.75
4	5.5	0.86	0.82	0.76	0.76
5.5	7.5	0.87	0.85	0.76	0.76
7.5	10	0.88	0.85	0.76	0.76
11	15	0.88	0.85	0.77	0.80
1.5	20	0.88	0.85	0.80	0.80
18.5	25	0.88	0.85	0.82	0.81
22	30	0.88	0.85	0.83	0.82
30	40	0.88	0.86	0.84	0.83
45	60	0.89	0.87	0.86	0.84
55	75	0.89	0.88	0.87	0.85
75	100	0.89	0.88	0.88	0.86
90	125	0.89	0.88	0.88	0.86

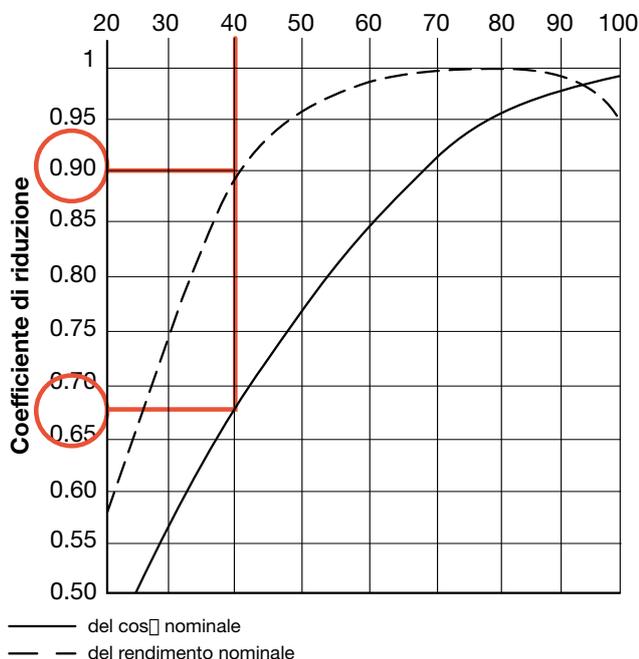
Rendimento in funzione della potenza



Se tale motore funziona al 40% della potenza nominale, dal diagramma dei coefficienti di riduzione seguente si ricava che:

$$\cos\varphi = \cos\varphi_n \cdot 0.67 = 0.52$$

$$\eta = \eta_n \cdot 0.9 = 0.77$$

Carico del motore (% della potenza nominale) $P_n\%$ 

Pertanto la potenza attiva P_a assorbita dalla rete è data da:

$$P_a = \frac{P_n}{\eta} = \frac{0.4 \cdot P_n}{\eta} = \frac{0.4 \cdot 11}{0.77} = 5.68 \text{ kW}$$

mentre la potenza reattiva Q_c necessaria per rifasare a $\cos\varphi = 0.9$ con $K=1.15$ ricavato dal nomogramma precedente risulta:

$$Q_c = K \cdot P = 1.15 \cdot 5.68 = 6.53 \text{ kvar}$$

Una regola generale, per svincolare il rifasamento dalle condizioni di utilizzazione del motore, è quella di utilizzare per un motore di potenza P_n una potenza reattiva di rifasamento Q_c non superiore al 90% della potenza reattiva assorbita dal motore a vuoto Q_0 alla tensione nominale U_n , per evitare di avere un fattore di potenza in anticipo. Inoltre con tale accorgimento si riduce la sovratensione di disinserzione del motore dalla rete; infatti il motore, mentre è ancora in rotazione, può funzionare come un generatore autoeccitato e può dar origine a tensioni considerevolmente superiori a quelli di rete [CEI EN 60831-1].

Considerando che a vuoto la corrente assorbita I_0 [A] sia puramente reattiva ($\sin\varphi = 1$), la potenza reattiva di rifasamento sarà:

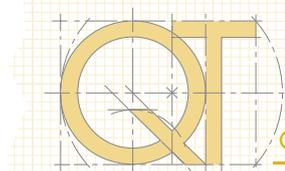
$$Q_c = 0.9 \cdot Q_0 = 0.9 \cdot \frac{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_0}{1000} \text{ [kvar]}$$

La corrente I_0 è generalmente fornita nella documentazione del costruttore del motore.

La tabella 7.3 indica i valori della potenza reattiva per rifasare alcuni tipi di motori ABB, in funzione della potenza e del numero di poli.

Tabella 7.3: potenza reattiva di rifasamento per i motori ABB

P_n [kW]	Q_c [kvar]	Prima del rifasamento		Dopo il rifasamento	
		$\cos\varphi_1$	I_n [A]	$\cos\varphi_2$	I_2 [A]
400 V / 50 Hz / 2 poli / 3000 giri/min					
7.5	2.5	0.89	13.9	0.98	12.7
11	2.5	0.88	20	0.95	18.6
15	5	0.9	26.5	0.98	24.2
18.5	5	0.91	32	0.98	29.7
22	5	0.89	38.5	0.96	35.8
30	10	0.88	53	0.97	47.9
37	10	0.89	64	0.97	58.8
45	12.5	0.88	79	0.96	72.2
55	15	0.89	95	0.97	87.3
75	15	0.88	131	0.94	122.2
90	15	0.9	152	0.95	143.9
110	20	0.86	194	0.92	181.0
132	30	0.88	228	0.95	210.9
160	30	0.89	269	0.95	252.2
200	30	0.9	334	0.95	317.5
250	40	0.92	410	0.96	391.0
315	50	0.92	510	0.96	486.3



P _n [kW]	Q _c [kvar]	Prima del rifasamento		Dopo il rifasamento	
		cosφ ₁	I _n [A]	cosφ ₂	I ₂ [A]
400 V / 50 Hz / 4 poli / 1500 giri/min					
7.5	2.5	0.86	14.2	0.96	12.7
11	5	0.81	21.5	0.96	18.2
15	5	0.84	28.5	0.95	25.3
18.5	7.5	0.84	35	0.96	30.5
22	10	0.83	41	0.97	35.1
30	15	0.83	56	0.98	47.5
37	15	0.84	68	0.97	59.1
45	20	0.83	83	0.97	71.1
55	20	0.86	98	0.97	86.9
75	20	0.86	135	0.95	122.8
90	20	0.87	158	0.94	145.9
110	30	0.87	192	0.96	174.8
132	40	0.87	232	0.96	209.6
160	40	0.86	282	0.94	257.4
200	50	0.86	351	0.94	320.2
250	50	0.87	430	0.94	399.4
315	60	0.87	545	0.93	507.9
400 V / 50 Hz / 6 poli / 1000 giri/min					
7.5	5	0.79	15.4	0.98	12.4
11	5	0.78	23	0.93	19.3
15	7.5	0.78	31	0.94	25.7
18.5	7.5	0.81	36	0.94	30.9
22	10	0.81	43	0.96	36.5
30	10	0.83	56	0.94	49.4
37	12.5	0.83	69	0.94	60.8
45	15	0.84	82	0.95	72.6
55	20	0.84	101	0.96	88.7
75	25	0.82	141	0.93	123.9
90	30	0.84	163	0.95	144.2
110	35	0.83	202	0.94	178.8
132	45	0.83	240	0.95	210.8
160	50	0.85	280	0.95	249.6
200	60	0.85	355	0.95	318.0
250	70	0.84	450	0.94	404.2
315	75	0.84	565	0.92	514.4
400 V / 50 Hz / 8 poli / 750 giri/min					
7.5	5	0.7	18.1	0.91	13.9
11	7.5	0.76	23.5	0.97	18.4
15	7.5	0.82	29	0.97	24.5
18.5	7.5	0.79	37	0.93	31.5
22	10	0.77	45	0.92	37.5
30	12.5	0.79	59	0.93	50.0
37	15	0.78	74	0.92	62.8
45	20	0.78	90	0.93	75.4
55	20	0.81	104	0.93	90.2
75	30	0.82	140	0.95	120.6
90	30	0.82	167	0.93	146.6
110	35	0.83	202	0.94	178.8
132	50	0.8	250	0.93	214.6

Esempio

Per un motore asincrono trifase da 110 kW (400 V - 50 Hz - 4 poli), la potenza di rifasamento suggerita dalla tabella è 30 kvar.

7.2 Rifasamento di trasformatori trifase

Il trasformatore è una macchina elettrica di primaria importanza che, per ragioni impiantistiche, rimane spesso costantemente in servizio.

In particolare, negli impianti elettrici costituiti da diverse cabine di trasformazione e di alimentazione dell'energia elettrica è consigliabile effettuare il rifasamento tenendo conto della potenza reattiva del trasformatore, al fine di mantenere un fattore di potenza medio pari a 0.9 lato media tensione .

In generale la potenza di rifasamento Q_c in un trasformatore di potenza nominale S_r [kVA] non dovrà essere superiore alla potenza reattiva assorbita nelle condizioni di carico di riferimento minime.

Ricavando dai dati di targa della macchina il valore percentuale della corrente a vuoto $i_0\%$, il valore della tensione di cortocircuito percentuale $u_k\%$, le perdite nel ferro P_{fe} e nel rame P_{cu} [kW] la potenza di rifasamento richiesta è circa:

$$Q_c = \sqrt{\left(\frac{i_0\%}{100} \cdot S_r\right)^2 - P_{fe}^2} + K_L^2 \cdot \sqrt{\left(\frac{u_k\%}{100} \cdot S_r\right)^2 - P_{cu}^2} \approx \dots$$

$$\dots \rightarrow \left(\frac{i_0\%}{100} \cdot S_r\right) + K_L^2 \cdot \left(\frac{u_k\%}{100} \cdot S_r\right) \text{ [kvar]}$$

dove K_L è il fattore di carico, definito come rapporto tra carico minimo di riferimento e potenza nominale del trasformatore.

Esempio

Si supponga di dover rifasare un trasformatore da 630 kVA in olio che alimenta un carico che è pari al 60% della sua potenza nominale.

Dai dati di targa del trasformatore:

$$i_0\% = 1.8\%$$

$$u_k\% = 4\%$$

$$P_{cu} = 8.9 \text{ kW}$$

$$P_{fe} = 1.2 \text{ kW}$$

La potenza di rifasamento della batteria di condensatori connessa al trasformatore dovrà essere:

$$Q_c = \sqrt{\left(\frac{i_0\%}{100} \cdot S_r\right)^2 - P_{fe}^2} + K_L^2 \cdot \sqrt{\left(\frac{u_k\%}{100} \cdot S_r\right)^2 - P_{cu}^2} = \dots$$

$$\dots \rightarrow \sqrt{\left(\frac{1.8\%}{100} \cdot 630\right)^2 - 1.2^2} + 0.6^2 \cdot \sqrt{\left(\frac{4\%}{100} \cdot 630\right)^2 - 8.9^2} = 19.8 \text{ kvar}$$

mentre utilizzando la formula semplificata risulta:

$$Q_c = \left(\frac{i_0\%}{100} \cdot S_r\right) + K_L^2 \cdot \left(\frac{u_k\%}{100} \cdot S_r\right) = \left(\frac{1.8\%}{100} \cdot 630\right) + \dots$$

$$\dots \rightarrow 0.6^2 \cdot \left(\frac{4\%}{100} \cdot 630\right) = 20.4 \text{ kvar}$$

La tabella 7.4 indica la potenza reattiva della batteria di condensatori Q_c [kvar] da collegare al secondario di un trasformatore ABB in funzione del diverso livello di carico

previsto. In particolare, la potenza reattiva di rifasamento varierà con legge quadratica rispetto al coefficiente di carico del trasformatore.

Tabella 7.4: potenza reattiva di rifasamento per trasformatori ABB

Trasformatore					Q_c [kvar]				
S_r [kVA]	u_k % [%]	i_0 % [%]	P_{fe} [kW]	P_{cu} [kW]	fattore di carico K_L				
					0	0.25	0.5	0.75	1
Trasformatore di distribuzione in olio MT-bt									
50	4	2.9	0.25	1.35	1.4	1.5	1.8	2.3	2.9
100	4	2.5	0.35	2.30	2.5	2.7	3.3	4.3	5.7
160	4	2.3	0.48	3.20	3.6	4	5	6.8	9.2
200	4	2.2	0.55	3.80	4.4	4.8	6.1	8.3	11
250	4	2.1	0.61	4.50	5.2	5.8	7.4	10	14
315	4	2	0.72	5.40	6.3	7	9.1	13	18
400	4	1.9	0.85	6.50	7.6	8.5	11	16	22
500	4	1.9	1.00	7.40	9.4	11	14	20	28
630	4	1.8	1.20	8.90	11	13	17	25	35
800	6	1.7	1.45	10.60	14	16	25	40	60
1000	6	1.6	1.75	13.00	16	20	31	49	74
1250	6	1.6	2.10	16.00	20	24	38	61	93
1600	6	1.5	2.80	18.00	24	30	47	77	118
2000	6	1.2	3.20	21.50	24	31	53	90	142
2500	6	1.1	3.70	24.00	27	37	64	111	175
3150	7	1.1	4.00	33.00	34	48	89	157	252
4000	7	1.4	4.80	38.00	56	73	125	212	333
Trasformatore di distribuzione in resina MT-bt									
100	6	2.3	0.50	1.70	2.2	2.6	3.7	5.5	8
160	6	2	0.65	2.40	3.1	3.7	5.5	8.4	12
200	6	1.9	0.85	2.90	3.7	4.4	6.6	10	15
250	6	1.8	0.95	3.30	4.4	5.3	8.1	13	19
315	6	1.7	1.05	4.20	5.3	6.4	9.9	16	24
400	6	1.5	1.20	4.80	5.9	7.3	12	19	29
500	6	1.4	1.45	5.80	6.8	8.7	14	23	36
630	6	1.3	1.60	7.00	8	10	17	29	45
800	6	1.1	1.94	8.20	8.6	12	20	35	56
1000	6	1	2.25	9.80	9.7	13	25	43	69
1250	6	0.9	3.30	13.00	11	15	29	52	85
1600	6	0.9	4.00	14.50	14	20	38	67	109
2000	6	0.8	4.60	15.50	15	23	45	82	134
2500	6	0.7	5.20	17.50	17	26	54	101	166
3150	8	0.6	6.00	19.00	18	34	81	159	269

Esempio

Per un trasformatore in olio ABB da 630 kVA con un fattore di carico di 0.5, la potenza di rifasamento necessaria è 17 kvar. Il regolatore del $\cos\varphi$ in bassa tensione deve essere tarato tenendo conto anche di questa potenza, oltre alla potenza reattiva richiesta dal carico.

Di conseguenza, per avere un fattore di potenza pari a 0.9 anche in media tensione, il regolatore sarà allora tarato ad un valore maggiore di 0.9. Difatti, ipotizzando che il trasformatore funzioni con un fattore di carico del 50%, la potenza apparente fornita è pari a:

$$S = 0.5 \cdot S_r = 0.5 \cdot 630 = 315 \text{ kVA}$$

Se il carico lavora per ipotesi con un fattore di potenza uguale a 0.8, la potenza attiva P assorbita risulta essere:

$$P = S \cdot \cos\varphi = 315 \cdot 0.8 = 252 \text{ kW}$$

Volendo rifasare tale carico a 0.9, la potenza reattiva necessaria è:

$$Q_r = P \cdot (\operatorname{tg}(\cos^{-1}(0.8)) - \operatorname{tg}(\cos^{-1}(0.9))) = \dots$$

$$\dots \rightarrow 252 \cdot (0.75 - 0.48) = 68 \text{ kvar}$$

Tenendo conto anche della potenza reattiva di cui necessita il trasformatore, la potenza complessiva che deve fornire il gruppo di rifasamento diviene:

$$Q_c = Q_r + Q_t = 68 + 17 = 85 \text{ kvar}$$

Pertanto il regolatore del fattore di potenza sarà allora tarato a:

$$\cos\varphi' = \cos\left(\operatorname{tg}^{-1}\left(\operatorname{tg}(\cos^{-1}(0.8)) - \frac{Q_c}{P}\right)\right) = \dots$$

$$\dots \rightarrow \cos\left(\operatorname{tg}^{-1}\left(\operatorname{tg}(36.87^\circ) - \frac{85}{252}\right)\right) = \cos\left(\operatorname{tg}^{-1}(0.75 - 0.34)\right) = 0.925$$

8 Le armoniche negli impianti elettrici

8.1 Le armoniche

Lo sviluppo tecnologico in campo industriale e domestico ha portato alla diffusione di apparecchiature elettroniche che, a causa del loro principio di funzionamento, assorbono una corrente non sinusoidale (carichi non lineari). Tale corrente provoca nella rete a monte una caduta di tensione anch'essa non sinusoidale con la conseguenza che anche i carichi lineari si trovano alimentati da una tensione distorta.

Le armoniche sono le componenti di una forma d'onda distorta e il loro utilizzo consente di analizzare una qualsiasi forma d'onda periodica non sinusoidale, scomponendola in diverse componenti sinusoidali.

Secondo il teorema di Fourier qualsiasi funzione periodica di periodo T generalmente continua e limitata¹ può essere rappresentata da una serie di infiniti termini sinusoidali con frequenza uguale a multipli interi della frequenza della funzione originaria.

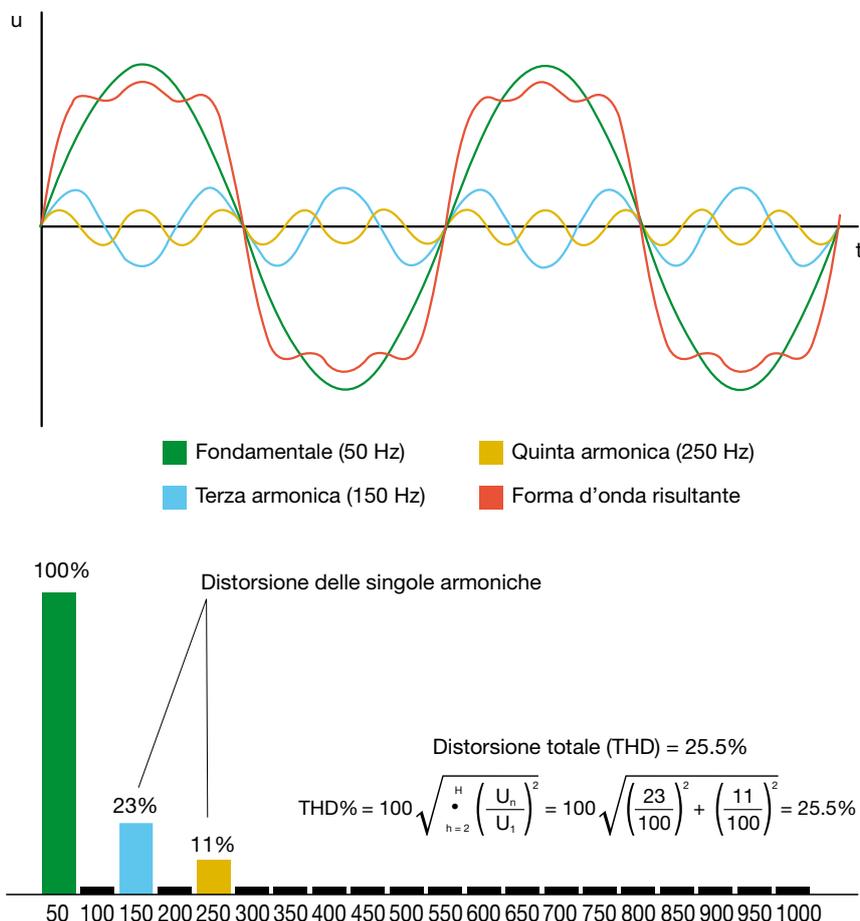
L'armonica con frequenza corrispondente al periodo della forma d'onda originaria è detta *armonica fondamentale* e l'armonica con frequenza uguale a "n" volte quella della fondamentale si chiama *armonica di ordine "n"*.

In base al teorema di Fourier una forma d'onda perfettamente sinusoidale non presenta armoniche di ordine diverso dalla fondamentale.

La presenza di armoniche in un sistema elettrico è quindi indice della deformazione della forma d'onda della tensione o della corrente e ciò comporta una distribuzione dell'energia elettrica tale da poter provocare cattivi funzionamenti alle apparecchiature.

¹ Si definisce periodica, generalmente continua e limitata una funzione che assume lo stesso valore dopo un periodo T ($f(x+T) = f(x)$) e che ha un numero finito di discontinuità non di seconda specie (ossia ha un limite superiore ed inferiore).

Figura 8.1



Le principali apparecchiature che generano armoniche sono:

- personal computer;
- lampade fluorescenti ed a scarica nei gas;
- convertitori statici;
- gruppi di continuità;
- azionamenti a velocità variabili;
- saldatrici;
- forni ad arco e ad induzione.

In generale la distorsione della forma d'onda è imputabile alla presenza, all'interno di tali apparecchiature di impedenze non lineari o tempo-varianti² o di ponti raddrizzatori i cui dispositivi a semiconduttori conducono solo per una frazione dell'intero periodo creando andamenti discontinui con la conseguente introduzione di numerose armoniche.

Come sarà illustrato nei paragrafi successivi la presenza di armoniche nella rete elettrica può provocare il danneggiamento di una batteria di condensatori.

8.2 Prescrizioni normative

Le norme tecniche stabiliscono precise prescrizioni da seguire per ridurre gli effetti delle armoniche nei condensatori.

La norma CEI EN 61642 *Reti industriali in corrente alternata affette da armoniche - Applicazione di filtri e di condensatori statici di rifasamento* identifica i problemi e fornisce raccomandazioni per le applicazioni generali dei condensatori ed i filtri di armoniche nelle reti di energia in corrente alternata affette dalla presenza di tensioni e di correnti armoniche.

In particolare illustra il problema della risonanza serie e parallelo e fornisce esempi chiarificatori.

8.3 Gli effetti delle armoniche

8.3.1 Sovraccarichi

La presenza di armoniche nella rete elettrica può essere causa di malfunzionamenti delle apparecchiature, quali sovraccarichi nel conduttore di neutro, aumento delle perdite nei trasformatori, disturbi nella coppia dei motori, ecc.

In particolare le armoniche rappresentano il fenomeno di cui più pesantemente risentono i condensatori di rifasamento.

Infatti, com'è noto, la reattanza capacitiva è inversamente proporzionale alla frequenza, quindi l'impedenza offerta alle armoniche di tensione diminuisce all'aumentare dell'ordine di armonicità. Ciò significa che, se alimentati da una tensione deformata, i condensatori possono assorbire una corrente di entità tale da poterli danneggiare seriamente.

Tabella 8.1

$X_C = \frac{1}{\omega \cdot C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C}$	$X_L = \omega \cdot L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L$
reattanza capacitiva	reattanza induttiva

In una batteria di condensatori, supposta connessa a triangolo, è possibile calcolare la corrente di linea corrispondente all'armonica n-esima in base alla seguente relazione:

$$I_n = \sqrt{3} \cdot n \cdot \omega \cdot C \cdot U_n \quad [8.1]$$

dove:

- I_n è la corrente corrispondente all'armonica n-esima;
- n è l'ordine delle armoniche;
- ω è la pulsazione dell'armonica fondamentale;
- C è la capacità del condensatore;
- U_n è la tensione concatenata corrispondente alla n-esima armonica.

La corrente totale di linea assorbita dalla batteria di condensatori sarà³:

$$I_c = \sqrt{3} \cdot \omega \cdot C \cdot \sqrt{U_1^2 + \sum_{n=2}^{\infty} (n \cdot U_n)^2} \quad [8.2]$$

Questa relazione evidenzia che la corrente assorbita in presenza di armoniche di tensione è maggiore di quella che si avrebbe in loro assenza. Per questo motivo le norme CEI EN 60831-1 e CEI EN 60931-1 richiedono che i condensatori siano adatti ad un funzionamento permanente con una corrente superiore alla corrente nominale della batteria (come sarà meglio illustrato nel capitolo successivo).

² I carichi tempo-varianti quali ad esempio i dispositivi per il controllo a treni d'onda o di fase, introducono non solo armoniche multiple della fondamentale ma anche interarmoniche.

³ Somma algebrica valida anche con i valori efficaci, dato che le componenti armoniche di corrente sono tutte in fase tra loro e con la fondamentale.

8.3.2 Risonanza

Un problema ancora più importante si verifica quando la distorsione in linea raggiunge valori elevati e diventa consistente il pericolo di risonanze tra il sistema di rifasamento (capacità equivalente dei condensatori) e l'induttanza equivalente della rete.

La risonanza si presenta quando la reattanza induttiva e capacitiva si eguagliano.

Di conseguenza, si parlerà di circuito risonante serie se l'induttanza e la capacità sono connesse in serie o di circuito risonante parallelo se l'induttanza e la capacità sono connesse in parallelo. Una risonanza serie e una risonanza parallelo possono essere presenti nella stessa rete. La risonanza avviene ad una precisa frequenza, detta appunto *frequenza di risonanza* f_r :⁴

$$X_L = X_C \rightarrow f_r = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}} \quad [8.3]$$

Se si ha risonanza serie, l'impedenza totale teoricamente si annulla⁵:

$$\bar{Z}_{tot} = j(X_L - X_C) = 0 \quad [8.4]$$

Dualmente, in presenza di risonanza parallelo, l'impedenza totale tende all'infinito:

$$\bar{Z}_{tot} = \frac{X_L \cdot X_C}{j(X_L - X_C)} \rightarrow \infty \quad [8.5]$$

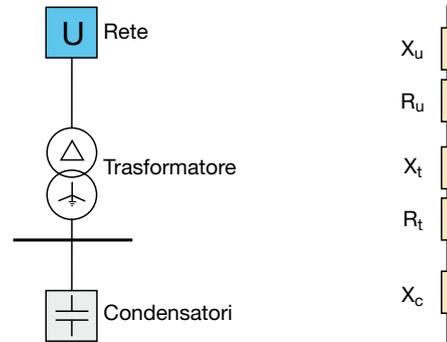
Se un circuito risonante serie è alimentato da una tensione alternata con una frequenza prossima alla frequenza di risonanza può verificarsi un'amplificazione della corrente assorbita che può provocare disturbi, sovracorrenti e anche il danneggiamento dei componenti della rete.

Viceversa, qualora un circuito risonante parallelo è alimentato da armoniche di corrente di carichi distorti può verificarsi una sovratensione in corrispondenza dell'armonica di risonanza.

$$\begin{aligned} X_L = X_C &\rightarrow \omega_r \cdot L = \frac{1}{\omega_r \cdot C} \rightarrow \omega_r^2 \cdot L \cdot C = 1 \quad \dots \\ \dots &\rightarrow (2 \cdot \pi \cdot f_r)^2 = \frac{1}{L \cdot C} \rightarrow f_r = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}} \end{aligned}$$

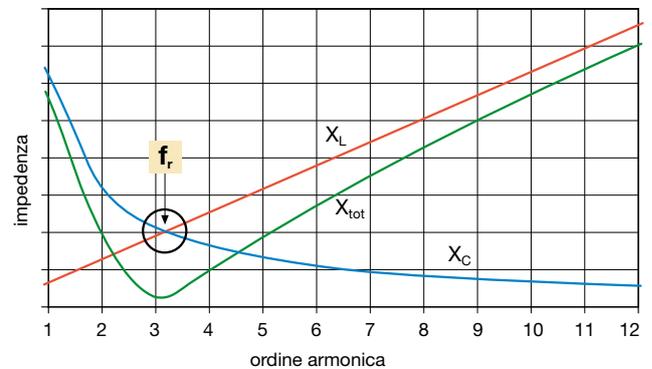
⁵ In realtà si riduce notevolmente e corrisponde unicamente alla componente resistiva dei cavi di collegamento.

Figura 8.2: esempio di circuito risonante serie



Il grafico seguente mostra l'andamento della reattanza capacitiva (decrescente con l'ordine di armonicità), induttiva (crescente con l'ordine di armonicità) e totale di una rete; la reattanza totale serie assume il suo valore minimo in corrispondenza della frequenza di risonanza (nell'esempio del grafico circa tre volte la frequenza fondamentale).

Figura 8.3



La frequenza di risonanza f_r può essere ricavata anche dalla seguente formula:

$$f_r = f_1 \cdot \sqrt{\frac{X_{C1}}{X_{L1}}} \quad [8.6]$$

dove:

- f_1 è la frequenza fondamentale;
- X_{C1} è la reattanza capacitiva del condensatore alla frequenza fondamentale;
- X_{L1} è la reattanza induttiva (alla frequenza fondamentale) della rete a monte del punto di installazione del condensatore.

In assenza di armoniche e nell'ipotesi che la frequenza di risonanza sia sufficientemente diversa dalla frequenza fondamentale del sistema di alimentazione, non si verificano sovracorrenti nelle linee.

Nel caso in cui fossero presenti delle armoniche, potrebbe verificarsi un'amplificazione della corrente in corrispondenza dell'armonica di ordine prossimo alla frequenza di risonanza. Per maggiori approfondimenti si rimanda alla norma CEI EN 61642 che riporta anche un esempio numerico di un circuito risonante serie da cui si evince che se la frequenza è prossima alla frequenza di risonanza serie, una tensione relativamente bassa sulle sbarre di alimentazione può determinare una corrente elevata.

Per evitare il fenomeno della risonanza, e quindi per evitare di ridurre la vita del condensatore, occorre far sì che la rete abbia una frequenza di risonanza il più possibile diversa da quella delle armoniche presenti.

La soluzione più comune, come illustrato anche nella norma CEI EN 61642, consiste nel connettere opportunamente una reattanza induttiva in serie al condensatore (*reattanza di sbarramento*); il reattore deve essere dimensionato in modo da ottenere una frequenza di risonanza inferiore alla più bassa frequenza armonica della tensione presente nel circuito.

Esempio

Supponiamo che nel circuito risonante serie della figura 8.2 l'armonica più bassa di ampiezza considerevole sia la quinta. Dalla relazione precedente:

$$f_1 \cdot \sqrt{\frac{X_{C1}}{X_{L1}}} < f_5 \rightarrow \sqrt{\frac{X_{C1}}{X_{L1}}} < \frac{f_5}{f_1} = 5 \rightarrow X_{L1} > 4\% X_{C1} \quad [8.7]$$

dove:

- X_{C1} è la reattanza capacitiva del condensatore alla frequenza fondamentale;
- X_{L1} è la reattanza inserita in serie al condensatore alla frequenza fondamentale.

Nel caso in cui l'armonica più bassa di ampiezza considerevole fosse la terza:

$$X_{L1} > 11.1\% X_{C1} \quad [8.7]$$

Dimensionando in tal modo l'induttanza, l'interazione dell'induttanza della rete e dell'impedenza (induttiva) della connessione induttore-condensatore non può più creare condizioni di risonanza, alle frequenze delle tensioni e delle correnti armoniche presenti sulla rete.

8.4 Filtri per armoniche

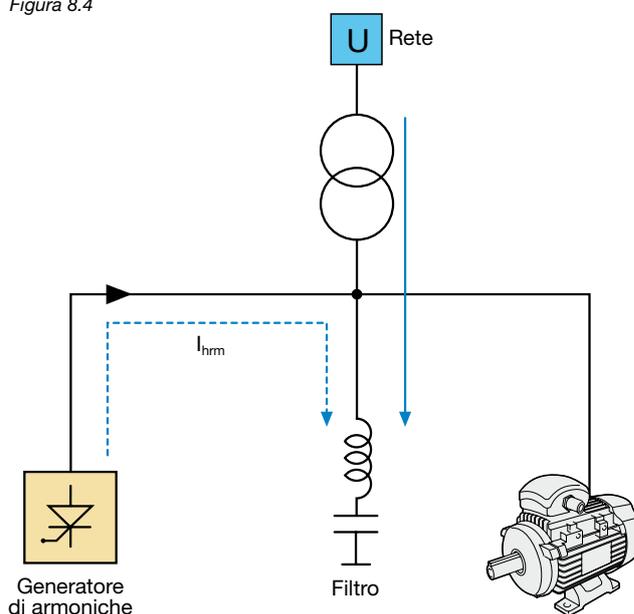
I banchi di condensatori possono essere utilizzati in combinazione con induttori per limitare gli effetti delle armoniche in una rete. Infatti, la combinazione condensatore-induttore costituisce un filtro nei confronti delle armoniche.

Precedentemente è stato illustrato che per evitare gli effetti negativi della risonanza è necessario inserire un induttore in serie ad un condensatore.

Ragionando in modo simile si può pensare di inserire in un punto della rete una combinazione di un induttore e un condensatore opportunamente dimensionati in modo da avere una frequenza di risonanza pari all'ordine dell'armonica di corrente che si vuole eliminare.

In questo modo il bipolo induttore-condensatore presenta una reattanza molto bassa in corrispondenza dell'armonica che si desidera eliminare la quale circolerà nel bipolo non interessando l'intera rete.

Figura 8.4

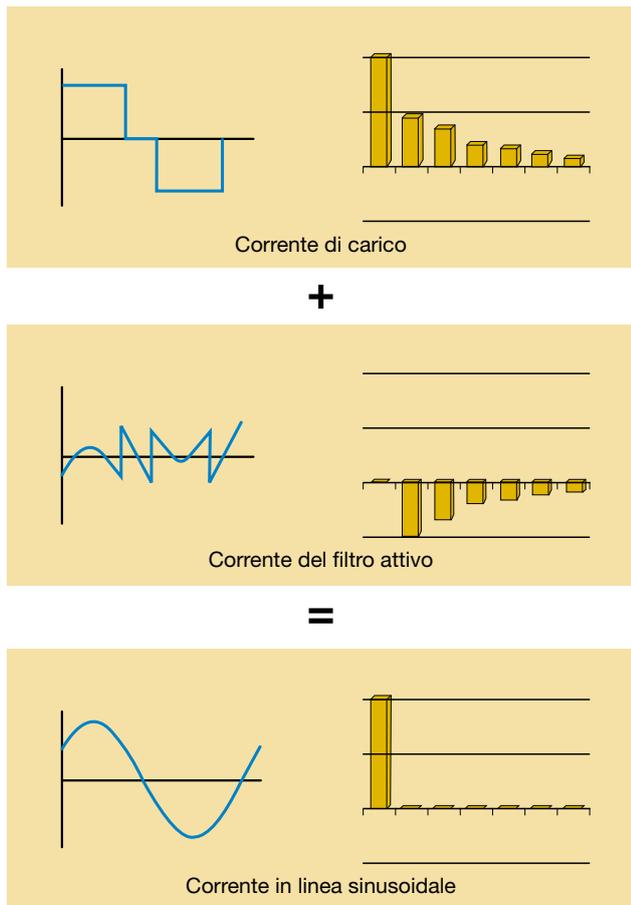


Tale filtro quindi, denominato *filtro passivo*, è composto da un condensatore collegato in serie con un induttore in modo che la frequenza di risonanza sia complessivamente pari alla frequenza dell'armonica che si desidera eliminare.

Il filtro passivo, che si determina caso per caso accordandolo su una particolare armonica da filtrare, è economico ed è facile da collegare e mettere in funzione.

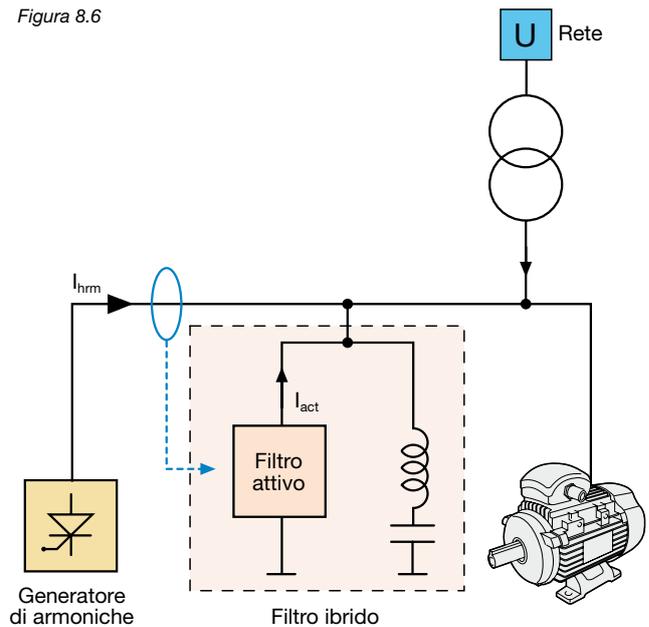
Il *filtro attivo* è invece in grado di eliminare in modo automatico le armoniche di corrente presenti in rete entro una vasta gamma di frequenze. Sfruttando la tecnologia elettronica, esso è in grado di immettere un sistema di armoniche in grado di annullare quelle presenti in rete.

Figura 8.5



Il filtro attivo ha il vantaggio di filtrare contemporaneamente decine di armoniche e non comporta costi di progettazione per il dimensionamento.

Figura 8.6



9 Manovra e protezione delle batterie di condensatori

9.1 Fenomeni elettrici legati all'inserzione

L'inserzione di una batteria di condensatori determina un transitorio elettrico dovuto ai fenomeni di carica elettrica della batteria. Di fatto si ha una sovracorrente a frequenza elevata (equivalente nei primi istanti ad un cortocircuito di breve durata), la cui ampiezza è funzione dei parametri della rete a monte e delle caratteristiche della batteria. La manovra comporta inoltre una sovratensione la cui onda di perturbazione si propaga lungo la rete. L'entità della sopraelevazione di tensione dipende dalla potenza reattiva Q_c fornita dalla batteria di condensatori e dal punto d'installazione della stessa. Si possono presentare in particolare due casi rilevanti:

- installazione subito a valle di un trasformatore di potenza apparente S_r (alimentato da una rete a potenza infinita) ed avente una tensione di cortocircuito percentuale $U_{cc}\%$. In questo caso si ha una sopraelevazione di tensione il cui valore può essere valutato in modo seguente¹:

$$\frac{\Delta U}{U_n} = \frac{U_{cc}\%}{100} \cdot \frac{Q_c}{S_r} \quad [9.1]$$

- installazione in un punto della rete avente potenza di cortocircuito S_{cc} . In tal caso la sovratensione può essere stimata secondo la relazione²:

$$\frac{\Delta U}{U_n} = \frac{Q_c}{S_{cc}} \quad [9.2]$$

Le sovracorrenti che si possono riscontrare al momento dell'inserzione dipendono molto sia dall'induttanza della rete a monte, sia dal numero delle batterie di condensatori inserite.

¹ La variazione di tensione è data da:

$$\frac{\Delta U}{U_n} = \frac{R \cdot P + X \cdot Q}{U_n^2}$$

In un trasformatore la resistenza degli avvolgimenti è trascurabile rispetto alla reattanza di dispersione, il che significa:

$$X_{cc} \approx Z_{cc}$$

Inoltre, poiché:

$$U_{cc}\% \approx Z_{cc}\% = \frac{Z_{cc}}{Z} \cdot 100 = \frac{Z_{cc}}{U_n^2 / S_n} \cdot 100$$

la variazione di tensione può essere espressa come:

$$\frac{\Delta U}{U_n} = \frac{X_{cc} \cdot Q}{U_n^2} \approx \frac{Z_{cc} \cdot Q}{U_n^2} = \frac{U_{cc}\%}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} \cdot \frac{Q}{U_n^2} = \frac{U_{cc}\%}{100} \cdot \frac{Q}{S_n}$$

da cui sostituendo a Q la potenza reattiva della batteria di condensatori Q_c che si sta inserendo, si ottiene la sovratensione causata dalla batteria stessa [9.1].

² Valida finché la rete a monte è prevalentemente induttiva. Infatti poiché:

$$S_{cc} = \frac{U_n^2}{X}$$

si ha:

$$\frac{\Delta U}{U_n} \approx \frac{X \cdot Q}{U_n^2} = \frac{U_n^2}{S_{cc}} \cdot \frac{Q}{U_n^2} = \frac{Q}{S_{cc}}$$

Nel caso di una batteria singola, il picco di corrente d'inserzione dipende fortemente dalla corrente di cortocircuito I_{cc} della rete a monte, la quale è influenzata dall'induttanza propria della rete L_0 secondo la relazione:

$$L_0 = \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot \omega \cdot I_{cc}} \quad [9.3]$$

Le norme CEI EN 62271-100 e CEI-EN 60831-1 forniscono le formule di calcolo del picco di corrente. In questo caso si ha:

$$i_p = U_n \cdot \sqrt{\frac{2}{3} \cdot \frac{C}{L_0 + L}} \approx U_n \cdot \sqrt{\frac{2}{3} \cdot \frac{C}{L_0}} \approx I_{cn} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot S_{cc}}{Q_c}} \quad [9.4]$$

poiché l'induttanza di collegamento della batteria di condensatori è molto inferiore a quella della rete a monte $L \ll L_0$.

In genere negli impianti il picco di corrente non supera il valore massimo stabilito per le batterie di condensatori (100 volte la corrente nominale della batteria); qualora il picco superi tale valore massimo o debba essere comunque ridotto per il corretto funzionamento delle apparecchiature di manovra, è necessario l'utilizzo di induttanze limitatrici in serie alla batteria di condensatori³.

Nel caso di inserzione di una batteria, in presenza di una o più batterie già in tensione occorre prevedere in serie ad ognuna di esse opportune induttanze limitatrici poiché ora il picco di corrente è molto più elevato a causa del brusco trasferimento di energia dalla o dalle batterie già in servizio a quella in inserimento.

Le relazioni fornite dalla norma precedente per il calcolo dei picchi sono rispettivamente:

- inserimento quando una batteria è già collegata

$$i_p = U_n \cdot \sqrt{\frac{2}{3} \cdot \frac{C_1 \cdot C}{C_1 + C} \cdot \frac{1}{L_1 + L}} \quad [9.5]$$

Se $L_1 = L$ e $C_1 = C$ allora:

$$i_p = U_n \cdot \sqrt{\frac{C}{6 \cdot L}} \quad [9.6]$$

- inserimento quando n batterie sono già collegate

$$L' = \frac{1}{\frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \dots + \frac{1}{L_n}} \quad [9.7]$$

Se $L_1 = L_2 = \dots = L$ e $C_1 = C_2 = \dots = C_n$ allora:

$$i_p = U_n \cdot \frac{n}{n+1} \cdot \sqrt{\frac{2}{3} \cdot \frac{C}{L}} \quad [9.8]$$

Le induttanze di limitazione utilizzate sono generalmente in aria senza nucleo magnetico ed i valori più spesso utilizzati sono: 50, 100 o 150 μH .

³ Non ci sono invece problemi quando un condensatore di rifasamento è inserito insieme con il carico che esso deve rifasare, quale ad esempio un motore, poiché la corrente del condensatore è compensata dalla componente induttiva della corrente assorbita dal motore.

9.2 Manovra e protezione

Un sistema di rifasamento è costituito essenzialmente da:

- un dispositivo di protezione;
- un'apparecchiatura di manovra (contattore);
- uno o più condensatori opportunamente connessi;
- eventuali resistori per la scarica del condensatore.

Nel caso di un sistema di rifasamento automatico sarà presente anche un regolatore del fattore di potenza che comanda l'inserzione o la disinserzione dei condensatori.

9.2.1 Scelta del dispositivo di protezione

I dispositivi impiegati per la protezione di batterie di condensatori devono soddisfare le seguenti condizioni:

1. sopportare le correnti transitorie che si verificano all'inserzione ed alla disinserzione della batteria. In particolare le protezioni istantanee degli sganciatori termomagnetici ed elettronici non devono intervenire con le correnti di inserzione;
2. sopportare le sovracorrenti periodiche o permanenti dovute alle armoniche di tensione ed alla tolleranza sul valore nominale della capacità;
3. essere coordinati con gli eventuali apparecchi di manovra esterni (contattori).

Inoltre il potere di chiusura e di interruzione dell'interruttore deve essere adeguato al livello di cortocircuito dell'impianto.

Le norme CEI EN 60831-1 e CEI EN 60931-1 affermano che:

- i condensatori devono poter funzionare a regime con una corrente in valore efficace fino al 30% superiore alla loro corrente nominale I_{cn} (ciò è dovuto alla possibile presenza di armoniche di tensione in rete);
- è ammessa una tolleranza (Variante 1 delle norme suddette) del +10% sul valore della capacità fino a batterie da 100 kvar e del +5% per batterie superiori a 100 kvar.

Pertanto la massima corrente che può assorbire la batteria di condensatori I_{cmax} sarà quindi:

$$Q_c \leq 100 \text{ kvar} \rightarrow I_{cmax} = 1.3 \cdot 1.1 \cdot \frac{Q_c}{\sqrt{3} \cdot U_n} = 1.43 \cdot I_{cn} \quad [9.9]$$

$$Q_c > 100 \text{ kvar} \rightarrow I_{cmax} = 1.3 \cdot 1.05 \cdot \frac{Q_c}{\sqrt{3} \cdot U_n} = 1.365 \cdot I_{cn}$$

dove:

- Q_c è la potenza reattiva;
- U_n è la tensione concatenata nominale;
- I_{cn} è la corrente nominale.

Riassumendo, dipendentemente dalla potenza reattiva nominale della batteria di condensatori, per la corretta protezione contro il sovraccarico:

- la corrente nominale dell'interruttore dovrà essere maggiore dei valori suddetti;
- la taratura della protezione contro il sovraccarico dovrà essere pari ai valori indicati.

L'inserzione di una batteria di condensatori, paragonabile ad una chiusura in cortocircuito, è associata a correnti transitorie a frequenza elevata ($1 \div 15$ kHz), di breve durata ($1 \div 3$ ms), con picco elevato ($25 \div 200 \cdot I_{cn}$).

Per la protezione della batteria di condensatori:

- l'interruttore dovrà possedere adeguato potere di chiusura;
- la regolazione della protezione istantanea contro il cortocircuito non dovrà generare interventi intempestivi.

La seconda condizione viene in genere rispettata:

- per sganciatori termomagnetici, regolando la protezione magnetica I_3 a valori non inferiori a $10 \cdot I_{cmax}$

$$I_3 \geq 10 \cdot I_{cmax} \quad [9.10]$$

- per sganciatori elettronici, settando in OFF la protezione istantanea contro il cortocircuito ($I_3 = \text{OFF}$).

9.2.2 Scelta del dispositivo manovra (contattore)

Il condensatore o la batteria di condensatori normalmente è manovrata da un contattore il quale deve essere scelto in maniera da poter funzionare correttamente; più precisamente il contattore deve essere dimensionato in modo da:

- portare permanentemente una corrente pari alla I_{cmax} del banco di condensatori;
- sopportare senza danneggiamenti la corrente di inserzione dei condensatori.

Inoltre il contattore deve essere protetto contro il cortocircuito dal dispositivo di protezione.

9.2.3 Scelta del condensatore

Il condensatore fornisce l'energia reattiva necessaria ad elevare il fattore di potenza al valore desiderato.

I dati caratteristici di un condensatore, riportati sulla sua targa sono:

- tensione nominale U_n ;
- frequenza nominale f ;
- potenza nominale Q_c , espressa in kvar (potenza reattiva della batteria di condensatori).

Occorre notare che la potenza reattiva resa alla tensione di esercizio differisce dalla potenza nominale di targa relativa alla tensione nominale; la seguente formula consente di calcolare la potenza effettiva di un condensatore o di una batteria di condensatori:

$$Q_{\text{resa}} = Q_c \cdot \left(\frac{U_e}{U_n} \right)^2 \quad [9.11]$$

dove:

- Q_c è la potenza alla tensione nominale U_n ;
- Q_{resa} è la potenza effettiva alla tensione di esercizio U_e .

Ad esempio un condensatore con una potenza reattiva nominale di 100 kvar a 500 V fornirà una potenza di 64 kvar a 400 V.

Dai dati di targa si possono ricavare le grandezze caratteristiche del condensatore:

Circuito monofase

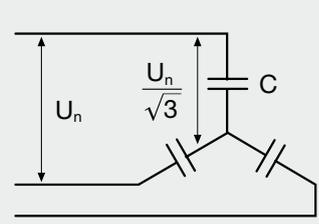
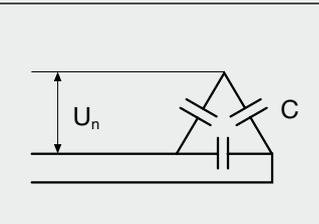
Tabella 9.1

Corrente nominale	$I_{cn} = \frac{Q_c}{V_n}$
Reattanza	$X_c = \frac{1}{\omega \cdot C}$
Capacità	$C = \frac{1}{\omega \cdot X_c} = \frac{Q_c}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot V_n^2}$

Circuito trifase

In un circuito trifase i condensatori possono essere collegati tra di loro a stella o a triangolo; la tabella seguente mostra i valori di potenza e corrente nominale secondo il tipo di collegamento.

Tabella 9.2

	Corrente nominale (di linea)	Corrente nei condensatori	Potenza
	$I_{cn} = \omega \cdot C \cdot \frac{U_n}{\sqrt{3}}$	$I_c = I_{cn}$	$Q_c = \sqrt{3} \cdot I_{cn} \cdot U_n = \omega \cdot C \cdot U_n^2$
	$I_{cn} = \sqrt{3} \cdot \omega \cdot C \cdot U_n$	$I_c = \omega \cdot C \cdot U_n$	$Q_c = \sqrt{3} \cdot I_{cn} \cdot U_n = 3 \cdot \omega \cdot C \cdot U_n^2$

9.2.4 Scarica dei condensatori

Nell'installazione di un condensatore occorre verificare che all'atto della disinserzione esso possa scaricarsi in modo da evitare ai suoi capi la presenza di una tensione pericolosa per le persone e le cose.

In accordo alla CEI EN 60252-2, nel rifasamento dei motori spesso non sono richiesti dispositivi di scarica, in particolare quando i condensatori sono permanentemente collegati ai morsetti degli avvolgimenti della macchina che fungono essi stessi da resistenze di scarica.

Quando è previsto un dispositivo di scarica, esso deve ridurre la tensione ai terminali del condensatore dal valore di picco della tensione nominale al valore inferiore o uguale a 50 V entro 1 min dall'istante di disinserzione. A volte un dispositivo di scarica può esser specificato non per motivi di sicurezza, ma per evitare eccessive sollecitazioni del condensatore: ciò può verificarsi quando un condensatore, disinserito ancora carico, viene ricollegato ad un altro condensatore di differente polarità.

Le norme CEI 64-8/5 art. 559.7 prescrivono l'utilizzo dei resistori di scarica per batterie di condensatori di

rifasamento aventi una capacità totale superiore a 0.5 μF (75/25 kvar con collegamento a triangolo/stella a 400 V).

I resistori hanno lo scopo di annullare, entro breve tempo la carica residua sulle armature del condensatore una volta che questo è stato disinserito dalla rete. È buona regola prevedere le resistenze di scarica per tutti i condensatori di potenza superiore a 0.5 kvar, qualunque sia la tensione di alimentazione.

In accordo alla CEI EN 60831-1 art. 22 *“Ciascuna unità capacitiva e/o batteria deve essere dotata di dispositivi che permettono la scarica di ciascuna unità a una tensione uguale o minore di 75 V in 3 min a partire da una tensione iniziale di picco pari a $\sqrt{2}$ volte la tensione nominale U_n ”* ma occorre sottolineare che in alcuni Paesi possono essere richiesti tempi di scarica differenti.

La resistenza di scarica in un'unità monofase o in una fase di unità polifase è data da:

$$R \leq \frac{t}{k \cdot C \cdot \ln \left(\frac{\sqrt{2} \cdot U_n}{U_r} \right)} \quad [9.12]$$

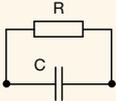
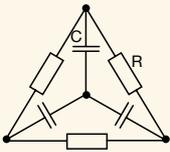
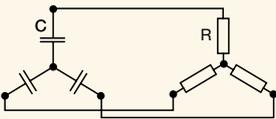
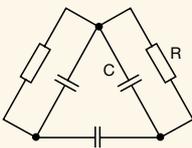
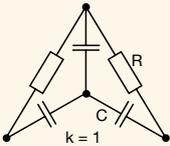
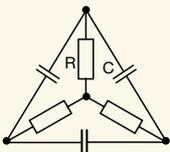
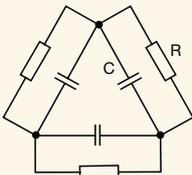
dove:

- R è la resistenza di scarica in $[\Omega]$;
- t è il tempo di scarica da $\sqrt{2} U_n$ a U_r , in [s];
- U_n è la tensione nominale in [V];
- U_r è la tensione residua ammessa⁴ in [V];
- k è un coefficiente che dipende dal metodo di collegamento dei resistori con le unità capacitive vedi tabella 9.3;
- C è il valore della capacità della batteria di condensatori [F].

Al fine di soddisfare le condizioni dettate dalla norma CEI EN 60831-1, nella formula precedente verrà posto $t = 180$ s e $U_r = 75$ V.

⁴ La tensione residua, all'atto dell'energizzazione, non deve superare il 10% della tensione nominale

Tabella 9.3

Collegamento	k
	1
	$\frac{1}{3}$
	1
	3
	1
	3
	1

10 Offerta ABB

10.1 Interruttori

ABB offre le seguenti tipologie di interruttori automatici scatolati e aperti per la protezione contro le sovracorrenti ed il sezionamento delle batterie di condensatori.

10.1.1 Interruttori scatolati Tmax T

Gli interruttori scatolati trifase della serie Tmax T conformi alla norma CEI EN 60947-2, equipaggiati con sganciatore termomagnetico o elettronico, con un campo di applicazione da 1.6 A a 1600 A e poteri d'interruzione da 10 kA a 200 kA @ 400 V.

Gli interruttori scatolati a disposizione sono:

- interruttori Tmax T1, T2, T3, T4 equipaggiati con sganciatori termomagnetici TMD con soglia termica regolabile ($I_1=0.7..1xI_n$) e magnetica fissa ($I_3=10xI_n$);
- interruttori Tmax T4, T5, T6 equipaggiati con sganciatori termomagnetici TMA con soglia termica

regolabile ($I_1=0.7..1xI_n$) e magnetica regolabile ($I_3=5..10xI_n$);

- interruttori Tmax T2, T4, T5, T6 equipaggiati con sganciatori elettronici PR221DS;
- interruttori Tmax T4, T5, T6 equipaggiati con sganciatori elettronici PR222DS/P, PR222DS/PD, PR223DS;
- interruttori Tmax T7 equipaggiati con sganciatori elettronici PR231/P, PR232/P, PR331/P, PR332/P.



Correnti nominali disponibili sugli interruttori scatolati Tmax T con le tipologie di sganciatori elettronici

	I_n [A]	10	25	63	100	160	250	320	400	630	800	1000	1250	1600
PR221DS	T2	■	■	■	■	■								
	T4				■	■	■	■						
	T5							■	■	■				
	T6									■	■	■		
PR222DS/P	T4				■	■	■	■						
PR222DS/PD	T5							■	■	■				
PR223DS	T6									■	■	■		
PR231/P PR232/P PR331/P PR332/P	T7								■	■	■	■	■	■

Caratteristiche degli interruttori scatolati Tmax T per protezione batterie di condensatori

		T1			T2						T3	
Corrente ininterrotta nominale I_u	[A]	160			160						250	
Tensione nominale d'impiego U_e	[V]	690			690						690	
Tensione nominale di tenuta all'impulso U_{imp}	[kV]	8			8						8	
Tensione nominale d'isolamento U_i	[V]	800			800						800	
Tensione di prova a frequenza industriale per 1 min.	[V]	3000			3000						3000	
Potere di interruzione nominale limite in cortocircuito I_{cw}		B	C	N	B	C	N	S	H	L	N	S
220-230V 50-60Hz	[kA]	25	40	50	25	40	65	85	100	120	50	85
380-400-415V 50-60Hz	[kA]	16	25	36	16	25	36	50	70	85	36	50
440V 50-60Hz	[kA]	10	15	22	10	15	30	45	55	75	25	40
500V 50-60Hz	[kA]	8	10	15	8	10	25	30	36	50	20	30
690V 50-60Hz	[kA]	3	4	6	3	4	6	7	8	10	5	8
Categoria di utilizzazione (IEC 60947-2)		A			A						A	
Attitudine al sezionamento		■			■						■	
Sganciatori: termomagnetico												
T regolabile, M fisso	TMD	■			■						■	
T regolabile, M regolabile ($5..10 \times I_n$)	TMA	-			-						-	
elettronico												
PR221DS		-			■						-	
PR222DS		-			-						-	
PR223DS		-			-						-	
PR231/P		-			-						-	
PR232/P		-			-						-	
PR331/P		-			-						-	
PR332/P		-			-						-	
Intercambiabilità		-			-						-	
Esecuzioni		F			F-P						F-P	

(1) $I_{cw} = 5kA$ - (2) $I_{cw} = 7.6kA$ (630A) - $10kA$ (800A) - (3) Solo per T7 800/1000/1250A - (4) $I_{cw} = 20kA$ (versione S,H,L) - $15kA$ (versione V)

Correnti nominali disponibili sugli interruttori scatolati Tmax T con le due tipologie di sganciatori termomagnetici

In [A]	T1 160	T2 160	T3 250	T4 250-320		T5 400-630	T6 630-800
	TMD	TMD	TMD	TMD	TMA	TMA	TMA
1,6		■					
2		■					
2,5		■					
3,2		■					
4		■					
5		■					
6,3		■					
8		■					
10		■					
12,5		■					
16	■	■					
20	■	■		■			
25	■	■					
32	■	■		■			
40	■	■					
50	■	■		■			
63	■	■	■				
80	■	■	■		■		
100	■	■	■		■		
125	■	■	■		■		
160	■	■	■		■		
200			■		■		
250			■		■		
320						■	
400						■	
500						■	
630							■
800							■

TMD sganciatore termomagnetico con soglia termica regolabile e magnetica fissa
 TMA sganciatore termomagnetico con soglie termica e magnetica regolabili

T4					T5					T6				T7			
250/320					400/630					630/800/1000				800/1000/1250/1600			
690					690					690				690			
8					8					8				8			
1000					1000					1000				1000			
3500					3500					3500				3500			
N	S	H	L	V	N	S	H	L	V	N	S	H	L	S	H	L	V ⁽³⁾
70	85	100	200	200	70	85	100	200	200	70	85	100	200	85	100	200	200
36	50	70	120	200	36	50	70	120	200	36	50	70	100	50	70	120	150
30	40	65	100	180	30	40	65	100	180	30	45	50	80	50	65	100	130
25	30	50	85	150	25	30	50	85	150	25	35	50	65	50	50	85	100
20	25	40	70	80	20	25	40	70	80	20	22	25	30	30	42	50	60
A					B (400A) ⁽¹⁾ - A (630A)					B (630A-800A) ⁽²⁾ - A (1000A)				B ⁽⁴⁾			
■					■					■				■			
■ (fino a 50A)					-					-				-			
■ (fino a 250A)					■ (fino a 500A)					■ (fino a 800A)				-			
■					■					■				-			
■					■					■				-			
■					■					■				-			
-					-					-				■			
-					-					-				■			
-					-					-				■			
-					-					-				■			
■					■					■				■			
F-P-W					F-P-W					F-W				F-W			

10.1.2 Nuova gamma Interruttori automatici scatolati SACE Tmax XT

ABB offre inoltre la nuova gamma di interruttori scatolati SACE Tmax XT fino a 250A.

Per la protezione della sezione alternata degli impianti fotovoltaici sono disponibili:

- gli interruttori XT1 160 e XT3 250 equipaggiati con sganciatori termomagnetici TMD con soglia termica regolabile ($I_1 = 0.7..1 \times I_n$) e magnetica fissa ($I_3 = 10 \times I_n$);

- gli interruttori XT2 160 e XT4 250 equipaggiati con sganciatori termomagnetici TMA (per $I_n \geq 40A$) con soglia termica regolabile ($I_1 = 0.7..1 \times I_n$) e magnetica I_3 regolabile tra $8..10 \times I_n$ per 40A, tra $6..10 \times I_n$ per 50A e tra $5..10 \times I_n$ per $I_n \geq 63A$, oppure con sganciatori elettronici Ekip anche a neutro maggiorato 160%.

Caratteristiche degli interruttori scatolati SACE Tmax XT per protezione batterie di condensatori

		XT1					XT2					XT3		XT4				
Taglia	[A]	160					160					250		160/250				
Poli	[Nc.]	3/4					3/4					3/4		3/4				
Tensione nominale d'impiego Ue	[V] (AC) 50-60 Hz	690					690					690		690				
Tensione nominale di tenuta all'impulso Uimp	[kV]	8					8					8		8				
Tensione nominale d'isolamento Ui	[V]	800					1000					800		1000				
Potere di interruzione nominale limite in cortocircuito Icu		B	C	N	S	H	N	S	H	L	V	N	S	N	S	H	L	V
(AC) 240V 50-60Hz	[kA]	25	40	65	85	100	65	85	100	150	200	50	85	65	85	100	150	200
(AC) 380V 50-60Hz	[kA]	18	25	36	50	70	36	50	70	120	200	36	50	36	50	70	120	150
(AC) 415V 50-60Hz	[kA]	18	25	36	50	70	36	50	70	120	150	36	50	36	50	70	120	150
(AC) 440V 50-60Hz	[kA]	15	25	36	50	65	36	50	65	100	150	25	40	36	50	65	100	150
(AC) 500V 50-60Hz	[kA]	8	18	30	36	50	30	36	50	60	70	20	30	30	36	50	60	70
(AC) 525V 50-60Hz	[kA]	6	8	22	35	35	20	25	30	36	50	13	20	20	25	45	50	50
(AC) 690V 50-60Hz	[kA]	3	4	6	8	10	10	12	15	18	20	5	8	10	12	15	20	25 (90) ⁽¹⁾
Categoria di utilizzazione (IEC 60947-2)		A					A					A		A				
Attitudine al sezionamento		■					■					■		■				
Sganciatori: termomagnetico																		
T regolabile, M fisso	TMD	■					■ (fino a 32A)					■		■ (fino a 32A)				
T regolabile, M regolabile	TMA	-					■					-		■				
solo magnetico	MF/MA	-					■					■		■				
elettronico Ekip		-					■					-		■				
Intercambiabilità		-					■					-		■				
Esecuzioni		F-P					F-P-W					F-P		F-P-W				

⁽¹⁾ 90 kA @ 690 V solo per XT4 160A.
Disponibile a breve, chiedere ad ABB Sace.



Correnti nominali disponibili sugli interruttori scatolati SACE Tmax XT con lo sganciatore elettronico Ekip

	In [A]	10	25	40	63	100	160	250
Ekip	XT2	■	■		■	■	■	
	XT4			■	■	■	■	■

Correnti nominali disponibili sugli interruttori scatolati SACE Tmax XT con le tipologie di sganciatori termomagnetici

In [A]	XT1 160	XT2 160			XT3 250		XT4 160-250	
	TMD	TMD/TMA	MF	MA	TMD	MA	TMD/TMA	MA
1			■					
1,6		■						
2		■	■					
2,5		■						
3,2		■						
4		■	■					
5		■						
6,3		■						
8		■						
8,5			■					
10		■						■
12,5		■	■					■
16	■	■					■	
20	■	■		■			■	■
25	■	■					■	■
32	■	■		■			■	■
40	■	■					■	
50	■	■					■	
52				■				■
63	■	■			■		■	
80	■	■		■	■		■	■
100	■	■		■	■	■	■	■
125	■	■			■	■	■	■
160	■	■			■	■	■	■
200					■	■	■	■
225								
250					■		■	

MF sganciatore solo magnetico con soglia fissa

MA sganciatore solo magnetico con soglia regolabile

TMD sganciatore termomagnetico con soglia termica regolabile e magnetica fissa

TMA sganciatore termomagnetico con soglie termica e magnetica regolabili

10.1.3 Interruttori aperti Emax

Gli interruttori automatici aperti della serie Emax E1..E6 conformi alla norma CEI EN 60947-2, con un campo di applicazione da 400 A a 6300 A, poteri d'interruzione da 42 kA a 150 kA @ 400 V ed equipaggiati con gli sganciatori elettronici PR121/P, PR122/P e PR123/P.

Gli interruttori automatici Emax X1, con un campo di applicazione da 400 A a 1600 A, poteri d'interruzione da 42 kA a 65 kA @ 400 V ed equipaggiati con gli sganciatori elettronici PR331/P, PR332/P e PR333/P.



Caratteristiche degli interruttori aperti Emax per protezione batterie di condensatori

		E1		E2			E3				E4			E6		X1		
Tensione nominale d'impiego Ue	[V]	690		690			690				690			690		690		
Tensione nominale di tenuta all'impulso Uimp	[kV]	12		12			12				12			12		12		
Tensione nominale d'isolamento Ui	[V]	1000		1000			1000				1000			1000		1000		
Corrente ininterrotta nominale Iu		B	N	B	N	S	N	S	H	V	S	H	V	H	V	B	N	
	[A]	800	800	1600	1000	800	2500	1000	800	800	4000	3200	3200	4000	3200	630	630	
	[A]	1000	1000	2000	1250	1000	3200	1250	1000	1250		4000	4000	5000	4000	800	800	
	[A]	1250	1250		1600	1250		1600	1250	1600					6300	5000	1000	1000
	[A]	1600	1600		2000	1600		2000	1600	2000					6300	1250	1250	
	[A]					2000		2500	2000	2500						1600	1600	
	[A]							3200	2500	3200								
Potere di interruzione nominale limite in cortocircuito Icu																		
220-230-380-400-415V 50-60Hz	[kA]	42	50	42	65	85	65	75	100	130	75	100	150	100	150	42	65	
440V 50-60Hz	[kA]	42	50	42	65	85	65	75	100	130	75	100	150	100	150	42	65	
500V 50-60Hz	[kA]	42	50	42	65	65	65	75	100	100	75	100	130	100	130	42	55	
690V 50-60Hz	[kA]	42	50	42	65	65	65	75	85	100	75	85	100	100	100	42	55	
Corrente ammissibile nominale di breve durata (1s) Icw	[kA]	42	50	42	55	65	65	75	75	85	75	100	100	100	100	42	42	
Categoria di utilizzazione (IEC 60947-2)		B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	
Attitudine al sezionamento		■		■			■				■			■		■		
Esecuzioni		F-W		F-W			F-W				F-W			F-W		F-W		

Correnti nominali disponibili sugli interruttori aperti Emax con le varie tipologie di sganciatori elettronici

		In [A]	400	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3200	4000	5000	6300
PR121/P PR122/P PR123/P	E1	■	■	■	■	■	■	■						
	E2	■	■	■	■	■	■	■	■					
	E3	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■			
	E4			■	■	■	■	■	■	■	■	■		
	E6			■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
PR331/P PR332/P PR333/P	X1	■	■	■	■	■	■	■						
		■	■	■	■	■	■	■						
		■	■	■	■	■	■	■						

10.2 Contattori

ABB offre tre versioni di contattori in base al valore del picco di corrente all'inserzione ed alla potenza della batteria di condensatori:

- *contattori tripolari UA..RA* con corrente di picco illimitata;
- *contattori tripolari UA* con corrente di picco minore o uguale a 100 volte il valore efficace della corrente nominale;
- *contattori tripolari standard A e AF* per inserzione batteria singola con corrente di picco inferiore o uguale a 30 volte il valore efficace della corrente nominale.

10.2.1 Contattori UA..RA

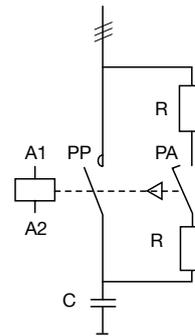
Si utilizzano in impianti con correnti di picco pari ad oltre 100 volte il valore efficace della corrente nominale, sono forniti con resistenze di assorbimento e sono quindi impiegati senza l'ausilio di induttanze limitatrici. I condensatori devono essere scaricati (massima tensione residua ai morsetti ≤ 50 V) prima di essere rieccitati alla chiusura dei contattori.

La loro vita elettrica è di 250.000 manovre per $U_e < 500$ V e 100.000 manovre per $500 \text{ V} \leq U_e \leq 690$ V.

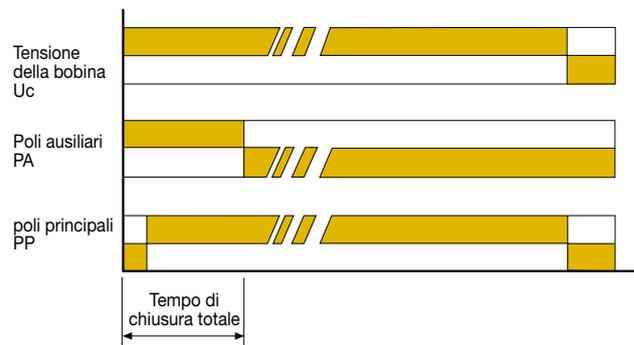
I contattori UA..RA sono equipaggiati con un blocco speciale montato frontalmente che consente l'inserzione in serie nel circuito di 3 resistenze che limitano il primo picco di corrente di alimentazione della batteria di condensatori e, favorendo la precarica dei condensatori, attenuano anche il secondo picco di corrente alla chiusura dei poli principali.

Come illustrato nello schema seguente, quando la bobina viene eccitata, i contatti ausiliari a chiusura anticipata PA collegano il condensatore alla rete tramite la serie delle resistenze.

Figura 10.1



Quando i poli principali PP sono in posizione di chiuso, si realizza automaticamente l'apertura dei poli ausiliari scollegando le resistenze, come rappresentato nel diagramma seguente.



Contattori UA...RA per inserzione di condensatori (UA16RA...UA110RA)

L'inserzione delle resistenze di assorbimento protegge il contacttore e il condensatore dalle correnti di inserzione più elevate.



10.2.2 Contattori UA

Si utilizzano per l'inserzione di batterie di condensatori con picchi di corrente all'inserzione fino a 100 volte la corrente nominale. I condensatori devono essere scaricati ed in questo caso la vita elettrica dei contattori è uguale a 100.000 manovre.

10.2.3 Contattori A e AF

Sono indicati per l'inserzione di singole batterie con correnti di picco inferiore a 30 volte la corrente nominale. I condensatori devono essere scaricati prima di essere rieccitati alla chiusura dei contattori ed in tal caso, la durata elettrica dei contattori è di 100.000 manovre.

Contattori UA per inserzione di condensatori (UA16 ... UA110)

Massima corrente di picco ammissibile $\hat{I} \leq 100$ volte il valore efficace della corrente nominale del condensatore.



Contattori standard A e AF (A12 ... A300 e AF50 ... AF750)

Massima corrente di picco ammissibile $\hat{I} < 30$ volte il valore efficace della corrente nominale del condensatore.



10.3 Compensatori automatici

La gamma di prodotti ABB per il rifasamento automatico include:

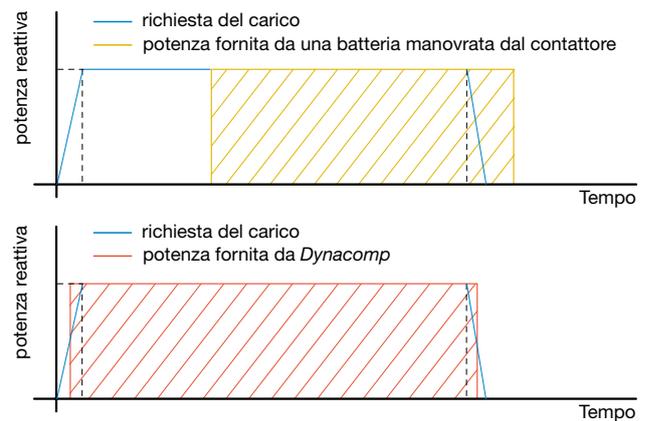
- la *serie APC*, compensatori statici dotati di contattori per l'inserzione delle batterie di condensatori. Tali dispositivi, disponibili con o senza reattori di sbarramento, sono la soluzione ideale per il rifasamento di carichi lentamente variabili. Possono produrre potenza reattiva da 25 a 800 kvar, con fattore di potenza impostabile da 0.7 induttivo a 0.7 capacitivo e con una tensione nominale fino a 690 V.
- la *serie Dynacomp*, compensatori statici costituiti da condensatori ed induttori che vengono connessi alla rete tramite interruttori statici di potenza. I *Dynacomp* sono progettati per soddisfare tutti i possibili requisiti di un carico velocemente variabile. Possono produrre potenza reattiva fino a 400 kvar per unità, con una tensione nominale fino a 690 V.

Nei *Dynacomp* i tiristori, posti in antiparallelo, sono comandati in istanti tali da non causare transitori elevati di corrente. Inoltre il controllo è tale da non generare a sua volta armoniche indesiderate in rete.

Le tradizionali batterie di condensatori sono corredate da resistori di scarica per limitare la tensione residua quando distaccati dalla rete.

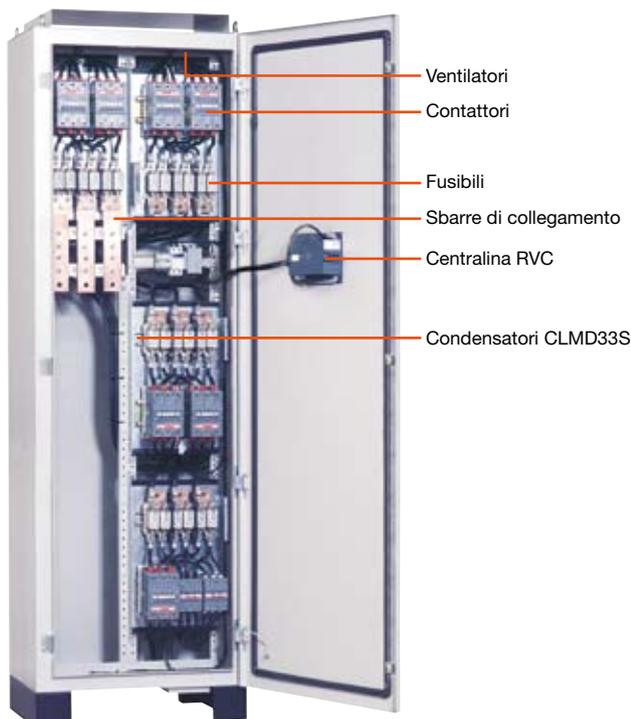
Tale manovra può richiedere diversi secondi, pertanto la risposta alle richieste di potenza reattiva della rete, può essere insufficientemente lenta, specie se si è in presenza di carichi il cui assorbimento di potenza reattiva varia frequentemente.

Al contrario il comando tramite tiristori ed il controllo in chiusura degli stessi, limita di molto nei *Dynacomp* il tempo di risposta alla richiesta di potenza reattiva, come si può notare nei due grafici seguenti.

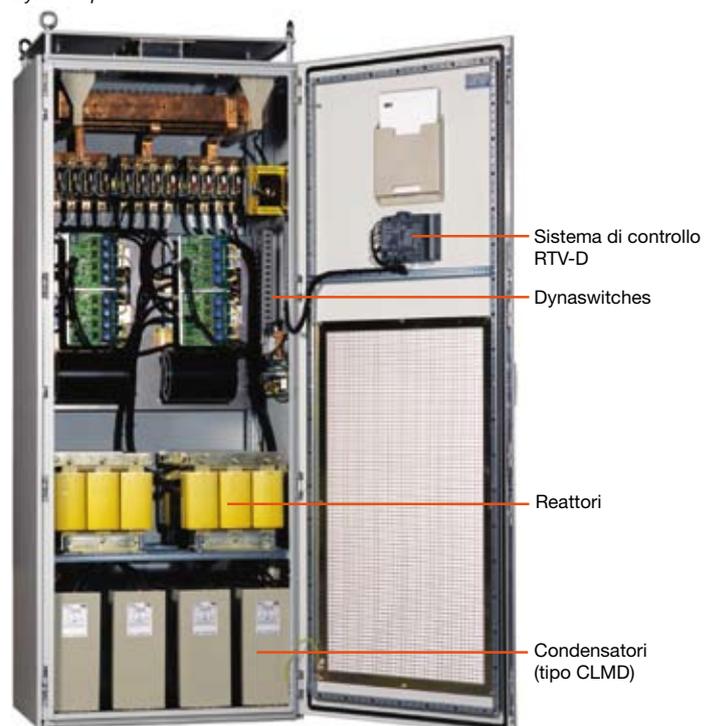


Come illustrato in figura, il *Dynacomp* è composto da condensatori, reattori, dynaswitches e sistemi di controllo elettronici. Questi componenti sono montati in un cubicolo insieme con un apparato ausiliario per formare un sistema assemblato e testato.

APC



Dynacomp



Un'ampia variazione della tensione di rete, una variazione flessibile della potenza, progetto modulare, scelta delle induttanze di disaccoppiamento, etc. sono alcune delle caratteristiche che fanno del *Dynacomp* la soluzione ideale per tutte quelle applicazioni richiedenti un veloce e dolce scambio di potenza reattiva.

I condensatori CLMD consistono in un numero di elementi avvolti in bobina e composti da un dielettrico con film di polipropilene metallizzato.

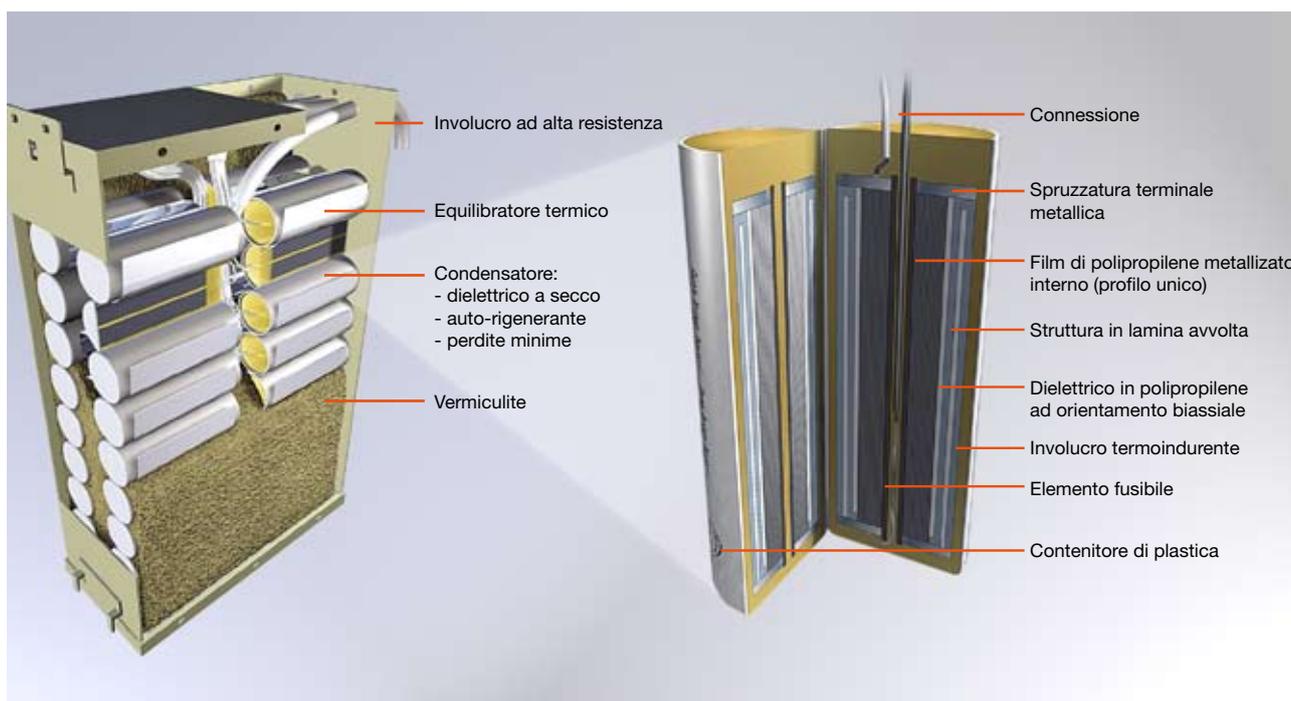
Sono equipaggiati con resistenze di scarica (<50 V in 1 minuto) e possono essere utilizzati senza la necessità di ulteriori resistenze di scarica aggiuntive.

Offrono i seguenti vantaggi: progetto a secco, tale da non creare rischi di dispersione o inquinamento nell'ambiente; il film metallizzato in polipropilene garantisce capacità di

sopportare tensioni elevate e picchi di corrente, elevata capacità di autorigenerazione, perdite contenute ed elevata stabilità del valore di capacità.

Gli elementi, inseriti in un contenitore di plastica ermetico, subiscono un trattamento sottovuoto che ne migliora le caratteristiche elettriche e ciascuno è dotato di un sistema di protezione che ne garantisce il sezionamento sicuro e selettivo al termine del ciclo di vita.

Gli elementi sono infine disposti all'interno di un alloggiamento in lamiera di acciaio riempito di materiale inerte e resistente al fuoco e collegati in modo da fornire la potenza (monofase o trifase) richiesta in presenza dei valori di tensione/frequenza assegnati.



10.4 Filtri PQF

I filtri ABB (*Power Quality Filters*) offrono la triplice funzione di filtraggio delle armoniche, compensazione della potenza reattiva e bilanciamento di carico.

I PQF, insensibili ad ampi cambiamenti dell'impedenza di rete, monitorizzano la corrente di linea in tempo reale e convertono le armoniche misurate in segnali digitali; questi sono elaborati da un controllore digitale generante segnali di controllo PWM (*Pulse Width Modulation*) che comandano dei convertitori di potenza a IGBT, i quali, attraverso dei condensatori in corrente continua, iniettano in rete delle armoniche di corrente di fase opposta a quella delle componenti che si vogliono filtrare.

I PQF offrono inoltre possibilità di comunicazione: infatti, dipendentemente dall'esistenza di una rete di comunicazione del cliente, sono disponibili differenti soluzioni, da contatti digitali di I/O ad una interfaccia di comunicazione Modbus RTU.

Il principio di funzionamento è illustrato nelle due figure seguenti.

La funzionalità di bilanciamento di carico consente di ripartire equamente la corrente di carico sulle tre fasi, riducendo la corrente circolante nel neutro.

Il sistema di compensazione dell'energia reattiva permette di rifasare con precisione al fattore di potenza prefissato sia per carichi induttivi che capacitivi.

Il sistema di controllo ad anello chiuso offre il vantaggio aggiuntivo di un funzionamento accurato ed affidabile, senza l'impiego di speciali dispositivi di misura.

I principali vantaggi tecnici dei PQF sono:

- filtraggio fino a 20 armoniche simultaneamente;
- filtraggio fino alla cinquantesima armonica;
- fattore di attenuazione armonica superiore al 97%;
- funzionamento in anello chiuso per una migliore accuratezza;
- auto-adattamento alla variazione dell'impedenza di rete;
- possibilità di filtraggio senza generazione di potenza reattiva;
- possibilità di generazione di potenza reattiva e controllo del fattore di potenza;
- possibilità di bilanciamento di carico tra le fasi e tra fasi e neutro.

Figura 10.2

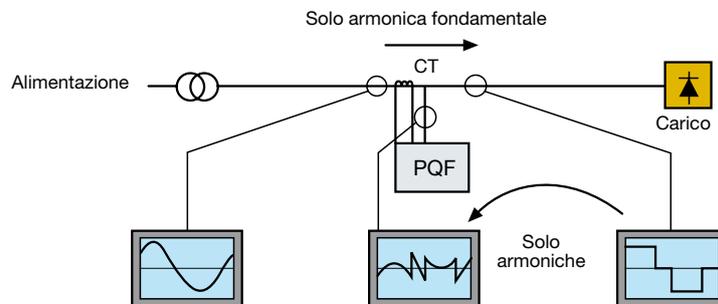
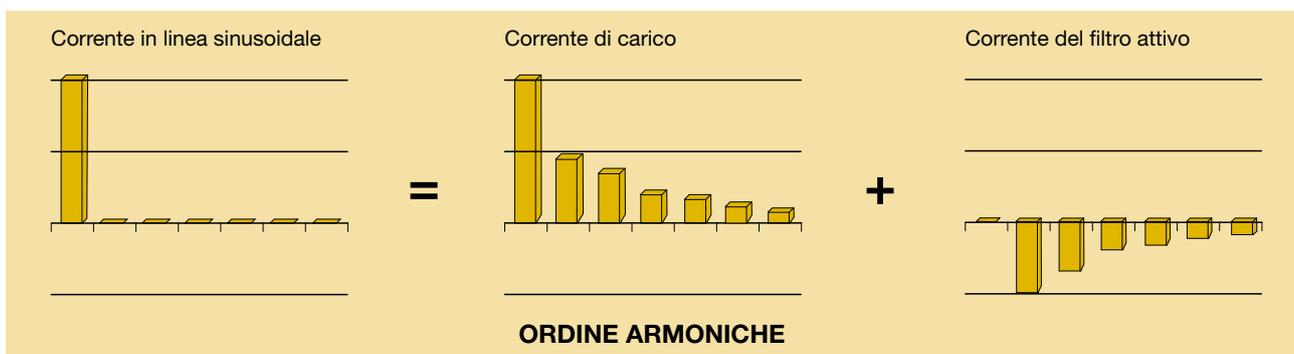


Figura 10.3



I PQF si differenziano in:

- **PQFI – Filtri attivi per grossi carichi industriali.** I filtri attivi per reti trifase con o senza neutro per filtraggio di armoniche non omopolari e per rifasamento comprendente bilanciamento di carico. La figura mostra il quadro costituente PQFI, con i principali componenti e le relative caratteristiche tecniche salienti.

Tali filtri presentano le seguenti caratteristiche tecniche principali:

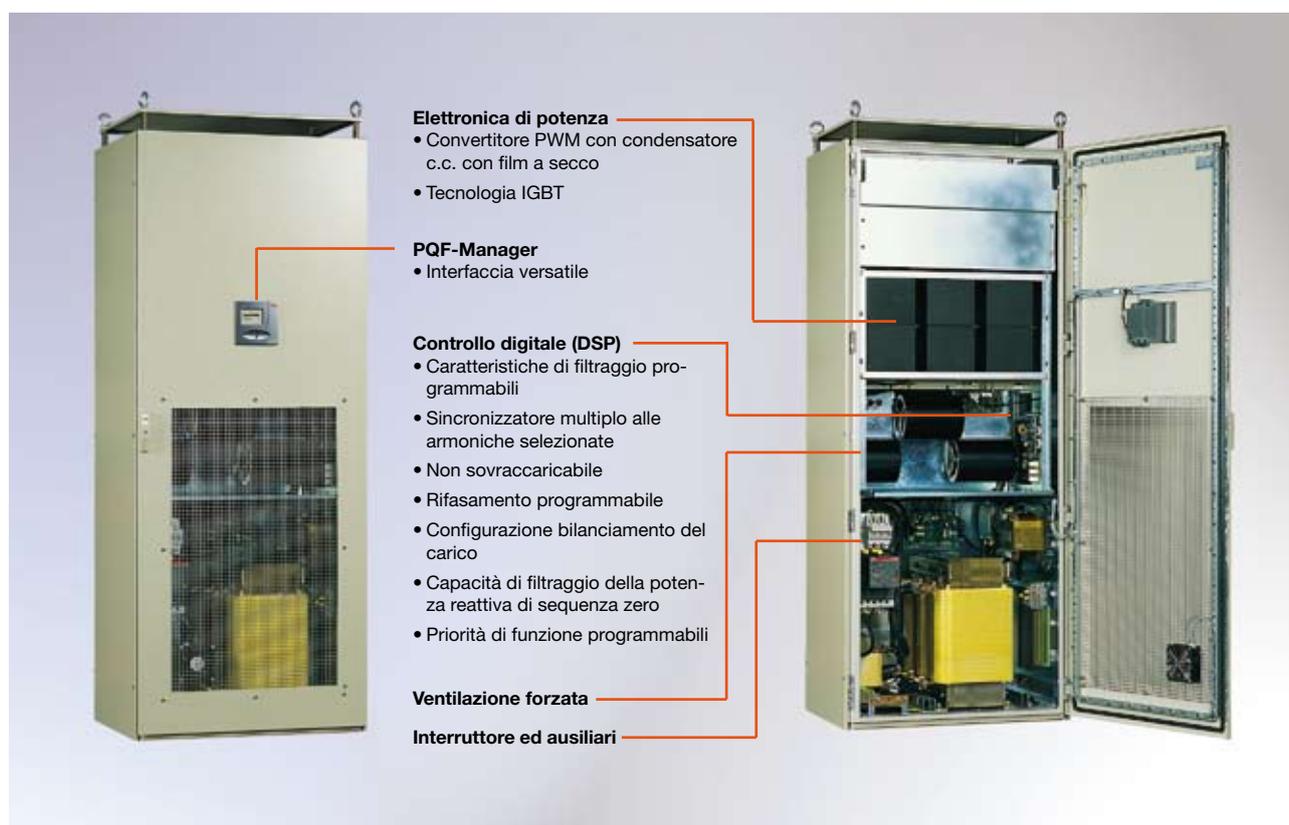
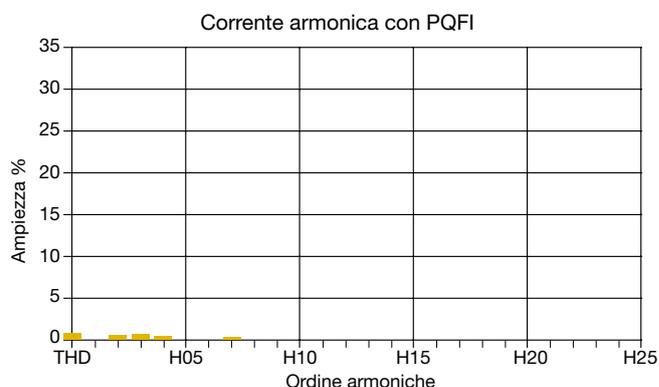
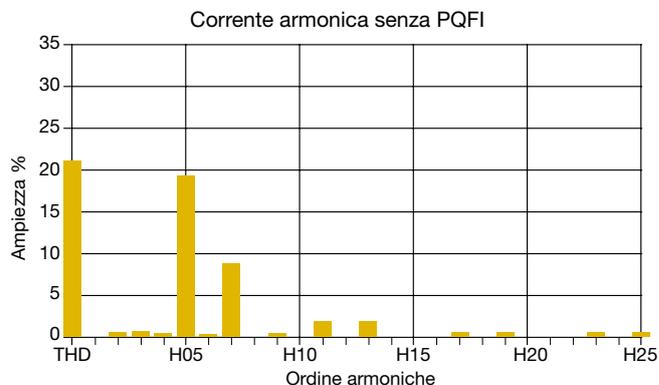
- Corrente nominale:

208 V ≤ U ≤ 480 V	480 V ≤ U ≤ 690 V
250 A	180 A*
450 A	320 A*

* se la tensione nominale è superiore a 600 V la corrente nominale delle unità di PQFI può essere automaticamente ridotta dipendentemente dalle condizioni di carico per temperatura ambiente superiore a 30°C.

- Armoniche filtrabili: 20 armoniche selezionabili dalla seconda alla cinquantesima.
- Potenza reattiva: fattore di potenza obiettivo impostabile da 0.6 induttivo a 0.6 capacitivo.

Risultato tipico di un'applicazione con PQFI



- **PQFM – Filtri attivi per carichi industriali di limitata potenza.** Filtri attivi per reti trifase con o senza neutro per filtraggio di armoniche non omopolari e per rifasamento comprendente bilanciamento di carico.

Tali filtri presentano le seguenti caratteristiche tecniche principali:

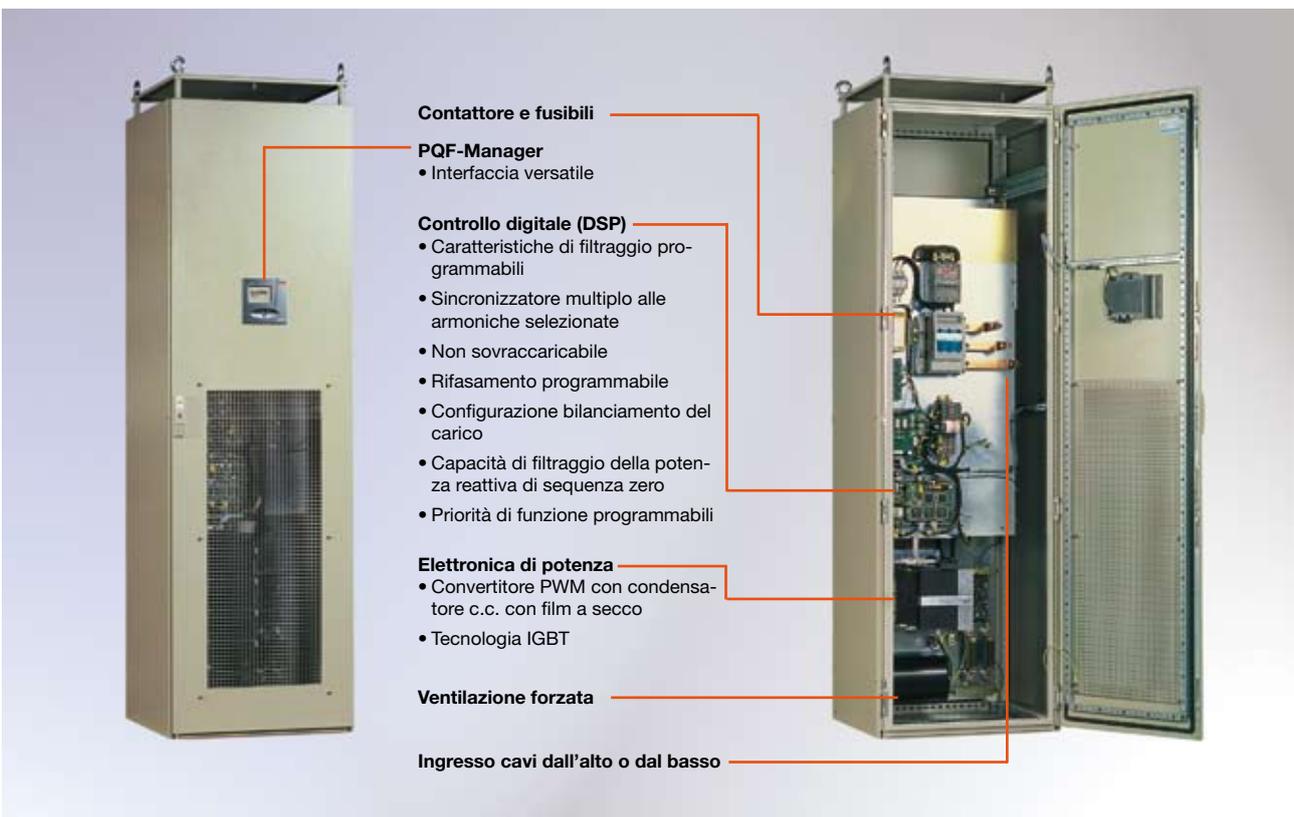
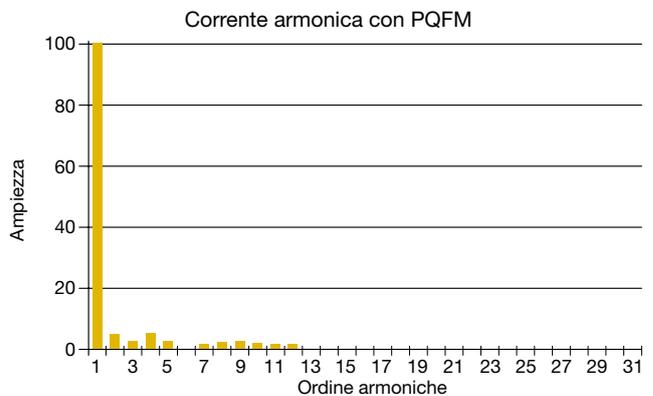
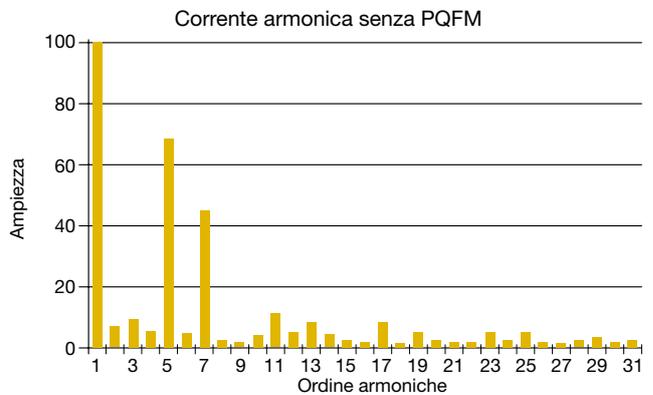
- Corrente nominale:

208 V ≤ U ≤ 480 V	480 V ≤ U ≤ 690 V
70 A	100 A*
100 A	-
130 A	-
150 A	-

* se la tensione nominale è superiore a 600 V la corrente nominale delle unità di PQFM può essere automaticamente ridotta dipendentemente dalle condizioni di carico per temperatura ambiente superiore a 30°C.

- Armoniche filtrabili: 20 armoniche selezionabili dalla seconda alla cinquantesima.
- Potenza reattiva: fattore di potenza obiettivo impostabile da 0.6 induttivo a 0.6 capacitivo.

Risultato tipico di un'applicazione con PQFM



- **PQFK – Filtri attivi per carichi commerciali contenenti armoniche omopolari nel neutro.**

Filtri attivi per reti trifase con filo neutro per filtraggio di armoniche includenti armoniche omopolari, per compensazione della potenza reattiva e bilanciamento sia tra le fasi che tra fase e neutro.

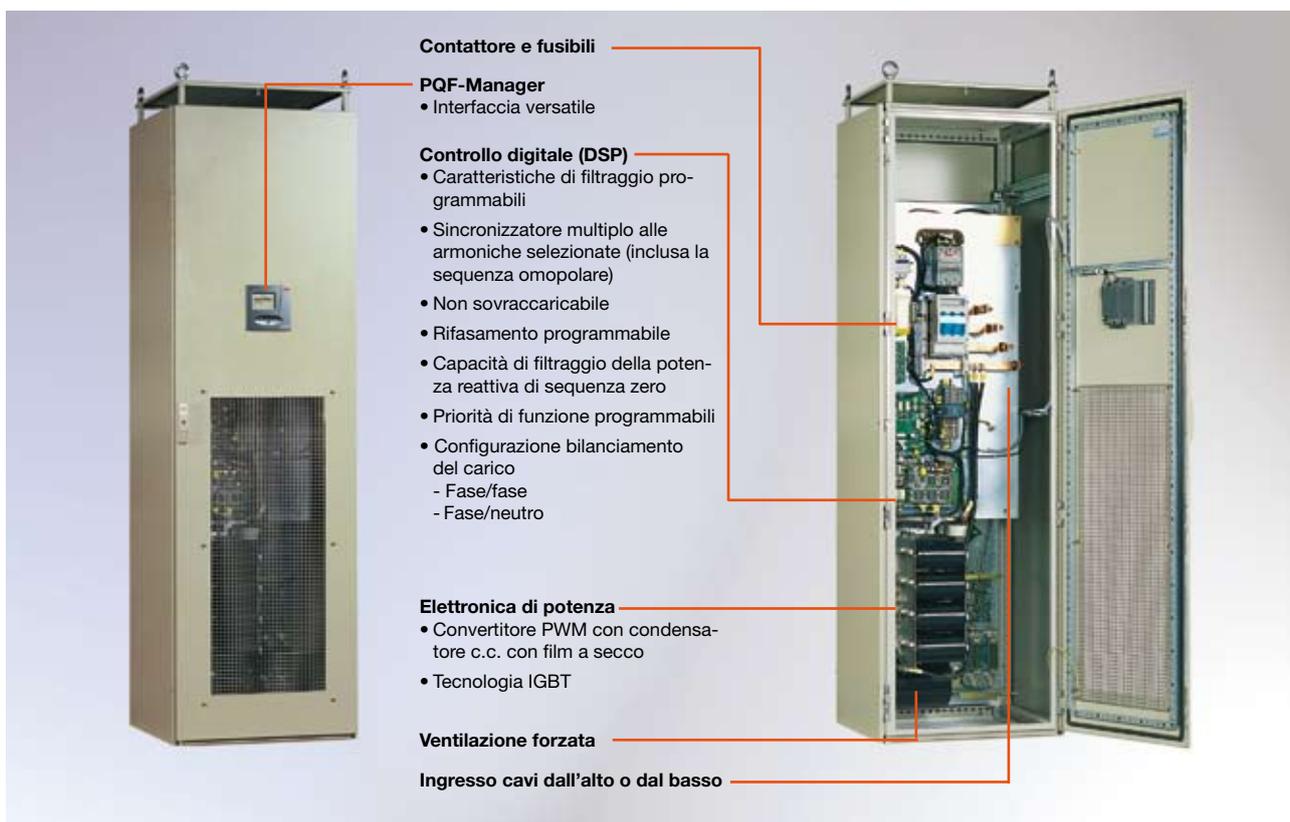
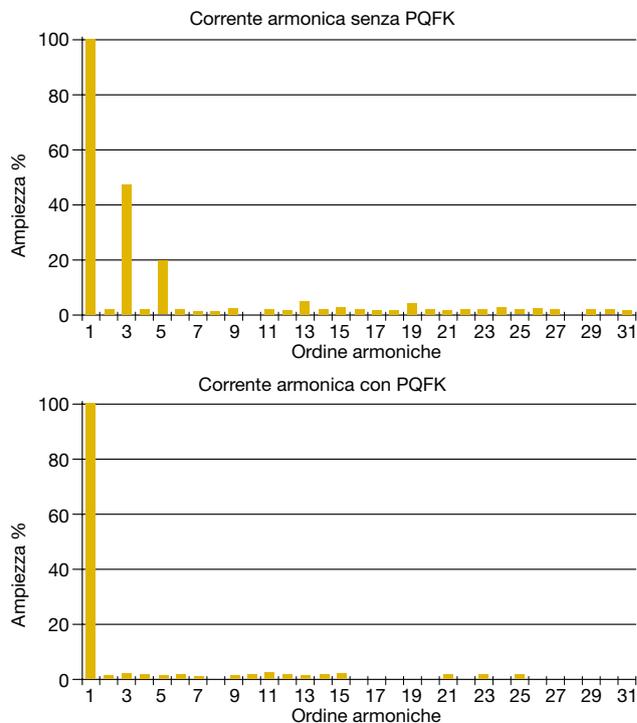
Tali filtri presentano le seguenti caratteristiche tecniche principali:

- Corrente nominale:

208 V ≤ U ≤ 415 V
70 A
100 A

- Armoniche filtrabili: 15 armoniche selezionabili dalla seconda alla cinquantesima.
- Potenza reattiva: fattore di potenza obiettivo impostabile da 0.6 induttivo a 0.6 capacitivo.

Risultato tipico di un'applicazione con PQFK



- **PQFS – Filtri attivi per carichi commerciali, ad uso domestico e luce industriali, con o senza neutro.**
Filtri attivi per reti trifase con o senza filo neutro per filtraggio di armoniche includenti armoniche omopolari, per compensazione della potenza reattiva e bilanciamento sia tra le fasi che tra fase e neutro.

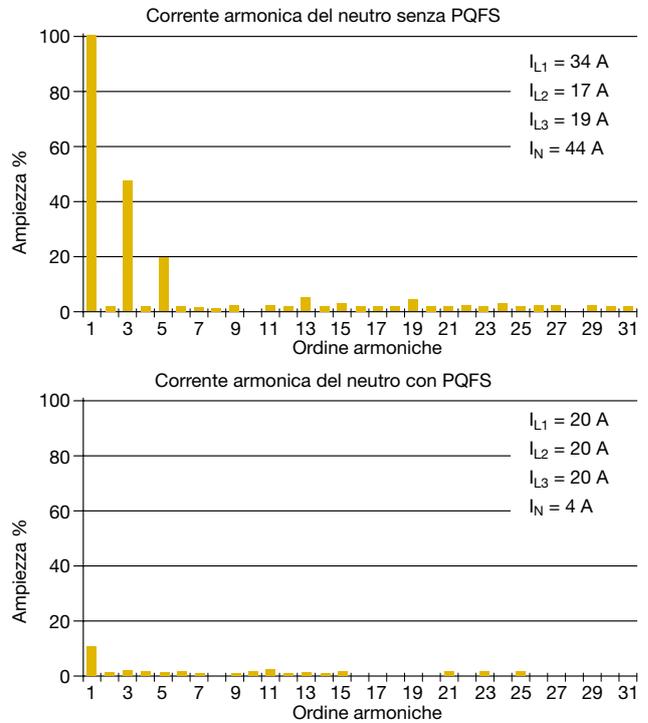
Tali filtri presentano le seguenti caratteristiche tecniche principali:

- Corrente nominale:

208 V ≤ U ≤ 240 V	380 V ≤ U ≤ 415 V
30 A	30 A
45 A	45 A
60 A	60 A
70 A	70 A
80 A	80 A
90 A	90 A
100 A	100 A

- Armoniche filtrabili:
 - connessione tripolare: 20 armoniche selezionabili dalla seconda alla cinquantesima;
 - connessione tetrapolare: 15 armoniche selezionabili dalla seconda alla cinquantesima.
- Potenza reattiva: fattore di potenza obiettivo impostabile tra 0.6 induttivo a 0.6 capacitivo.

Risultato tipico di un'applicazione con PQFS




Versione compatta a parete funzionalità a 3 o 4 fili

PQF-Manager

- Interfaccia versatile

Controllo digitale (DSP)

- Caratteristiche di filtraggio programmabili
- Sincronizzatore multiplo alle armoniche selezionate (inclusa la sequenza omopolare)
- Non sovraccaricabile
- Rifasamento programmabile
- Configurazione bilanciamento del carico
 - Fase/fase
 - Fase/neutro
- Capacità di filtraggio della potenza reattiva di sequenza zero
- Priorità di funzione programmabili

Elettronica di potenza

- Convertitore PWM con condensatore c.c. con film a secco
- Tecnologia IGBT

Ingresso cavi dal basso

Appendice A

Tabelle di scelta interruttori e contattori

Nelle tabelle seguenti vengono forniti i coordinamenti tra interruttori scatolati serie Tmax T, SACE Tmax XT e contattori ABB per manovra e protezione di batterie di condensatori.

Si ipotizza una corrente di corto circuito presunta di 50 kA per le tensioni fino a 500 V e di 10 kA per la tensione di 690 V ed un coordinamento di tipo 2¹.

Le correnti nominali dell'interruttore e del contactore sono scelte in base alla massima corrente che può assorbire la batteria di condensatori (I_{cmax}), secondo quanto prescritto dalla norma CEI EN 60831-1 A1.

È necessaria l'installazione di induttanze di limitazione al fine di ridurre la corrente d'inserzione.

¹ Si ricorda che nel coordinamento di tipo 2 è permessa la saldatura dei contatti del contactore purché facilmente separabili (ad es. con l'azione di un cacciavite) senza deformazione significativa.

Tabella A.1

Coordinamento tipo 2 interruttore-contactore per inserzione batterie di condensatori a 400 V, 50 kA

Q_c [kvar]	I_{cn} [A]	I_{cmax} [A]	Interruttore Tmax	I_n [A]	Contactore
10	14	21	XTS160 TMD 25	25	A30
15	22	31	XT2S160 TMA 40	40	A/AF50
20	29	41	XT2S160 TMA 50	50	A/AF50
30	43	62	XT2S160 TMA 80	80	A/AF63
40	58	83	XT2S160 TMA 100	100	A/AF63
50	72	103	XT2S160 TMA 125	125	A/AF95
60	87	124	XT2S160 TMA 160	160	A/AF95
70	101	144	XT2S160 TMA 160	160	A/AF110
80	115	165	XT3S250 TMD 200	200	A/AF145
90	130	186	XT3S250 TMD 200	200	A/AF145
110	159	217	XT3S250 TMD 250	250	A/AF185
130	188	256	T4S320 PR221LS/I In=320	320	A/AF210
150	217	296	T4S320 PR221LS/I In=320	320	A/AF260
180	260	355	T5S400 PR221LS/I In=400	400	AF400
200	289	394	T5S400 PR221LS/I In=400	400	AF400
250	361	493	T6S630 PR221LS/I In=630	630	AF580
280	404	552	T6S630 PR221LS/I In=630	630	AF580
300	433	591	T6S630 PR221LS/I In=630	630	AF750
350	505	690	T6S800 PR221LS/I In=800	800	AF750
400	577	788	T6S800 PR221LS/I In=800	800	AF750
500	722	985	T7S1000 PR232LSI In=1000	1000	AF1650

Tabella A.2

Coordinamento tipo 2 interruttore-contactore per inserzione batterie di condensatori a 440 V, 50 kA

Q_c [kvar]	I_{cn} [A]	I_{cmax} [A]	Interruttore Tmax	I_n [A]	Contactore
10	13	19	XT2S160 TMD 25	25	A/AF50
15	20	28	XT2S160 TMD 32	32	A/AF50
20	26	38	XT2S160 TMA 40	40	A/AF50
30	39	56	XT2S160 TMA 63	63	A/AF50
40	52	75	XT2S160 TMA 100	100	A/AF95
50	66	94	XT2S160 TMA 125	125	A/AF95
60	79	113	XT2S160 TMA 125	125	A/AF95
70	92	131	XT2S160 TMA 160	160	A/AF110
80	105	150	XT2S160 TMA 160	160	A/AF145
90	118	169	XT4S250 EkipLS/I In=250	250	A/AF145
110	144	197	XT4S250 EkipLS/I In=250	250	A/AF185
130	171	233	XT4S250 EkipLS/I In=250	250	A/AF210
150	197	269	T4H320 PR221LS/I In=320	320	A/AF260
180	236	322	T5H400 PR221LS/I In=400	400	A/AF300
200	262	358	T5H400 PR221LS/I In=400	400	AF400
250	328	448	T6H630 PR221LS/I In=630	630	AF460
280	367	502	T6H630 PR221LS/I In=630	630	AF580
300	394	537	T6H630 PR221LS/I In=630	630	AF580
350	459	627	T6H800 PR221LS/I In=800	800	AF750
400	525	716	T6H800 PR221LS/I In=800	800	AF750
500	656	896	T7S1000 PR232LSI In=1000	1000	AF1650

Tabella A.3

Coordinamento tipo 2 interruttore-contattore per inserzione batterie di condensatori a 500 V, 50 kA

Q_c [kvar]	I_{cn} [A]	I_{cmax} [A]	Interruttore Tmax	I_n [A]	Contattore
10	12	17	XT2H160 TMD 20	20	A/AF50
15	17	25	XT2H160 TMD 32	32	A/AF50
20	23	33	XT2H160 TMA 40	40	A/AF50
30	35	50	XT2H160 TMA 63	63	A/AF63
40	46	66	XT2H160 TMA 80	80	A/AF75
50	58	83	XT2H160 TMA 100	100	A/AF95
60	69	99	XT2H160 TMA 125	125	A/AF95
70	81	116	XT2H160 TMA 125	125	A/AF95
80	92	132	XT2H160 TMA 160	160	A/AF110
90	104	149	XT2H160 TMA 160	160	A/AF145
110	127	173	XT4H250 EkipLS/I In=250	250	A/AF145
130	150	205	XT4H250 EkipLS/I In=250	250	A/AF185
150	173	236	XT4H250 EkipLS/I In=250	250	A/AF210
180	208	284	T4H320 PR221LS/I In=320	320	A/AF260
200	231	315	T5H400 PR221LS/I In=400	400	A/AF300
250	289	394	T5H400 PR221LS/I In=400	400	AF400
280	323	441	T6H630 PR221LS/I In=630	630	AF460
300	346	473	T6H630 PR221LS/I In=630	630	AF460
350	404	552	T6H630 PR221LS/I In=630	630	AF580
400	462	630	T6H800 PR221LS/I In=800	800	AF750
500	577	788	T6H800 PR221LS/I In=800	800	AF1350
600	693	946	T7H1000 PR232LSI In=1000	1000	AF1650

Tabella A.4

Coordinamento tipo 2 interruttore-contattore per inserzione batterie di condensatori a 690 V, 10 kA

Q_c [kvar]	I_{cn} [A]	I_{cmax} [A]	Interruttore Tmax	I_n [A]	Contattore
10	8	12	XT2N160 TMD 16	16	A/AF50
15	13	18	XT2N160 TMD 20	20	A/AF50
20	17	24	XT2N160 TMD 25	25	A/AF50
30	25	36	XT2N160 TMA 40	40	A/AF50
40	33	48	XT2N160 TMA 50	50	A/AF63
50	42	60	XT2N160 TMA 63	63	A/AF63
60	50	72	XT2N160 TMA 80	80	A/AF75
70	59	84	XT2N160 TMA 100	100	A/AF95
80	67	96	XT2N160 TMA 100	100	A/AF95
90	75	108	XT2N160 TMA 125	125	A/AF110
110	92	126	XT2N160 TMA 160	160	A/AF145
130	109	148	XT2N160 TMA 160	160	A/AF185
150	126	171	XT4N250 EkipLS/I In=250	250	A/AF210
180	151	206	XT4N250 EkipLS/I In=250	250	A/AF260
200	167	228	XT4N250 EkipLS/I In=250	250	A/AF260
250	209	286	T4N320 PR221LS/I In=320	320	AF400
280	234	320	T5N400 PR221LS/I In=400	400	AF400
300	251	343	T5N400 PR221LS/I In=400	400	AF400
350	293	400	T6N630 PR221LS/I In=630	630	AF460
400	335	457	T6N630 PR221LS/I In=630	630	AF580
500	418	571	T6N630 PR221LS/I In=630	630	AF750
600	502	685	T6N800 PR221LS/I In=800	800	AF1350
700	586	800	T7S1000 PR232LSI In=1000	1000	AF1650
800	669	914	T7S1000 PR232LSI In=1000	1000	AF1650

Nella tabella seguente per manovra-protezione condensatori tramite interruttori aperti, viene utilizzata in particolare la seguente simbologia:

- N_{mec} numero di manovre meccaniche;
- f_{mec} frequenza di manovra per le manovre meccaniche [op/h];
- N_{el} numero di manovre elettriche riferite ad una tensione di 440 V;
- f_{el} frequenza di manovra per le manovre elettriche [op/h].

In questo caso, data la grossa taglia della batteria di condensatori, non viene considerata la manovra di

inserzione tramite contattore, bensì la manovra diretta tramite interruttore, dato anche che il numero di manovre dovrà essere limitato e potranno quindi essere eseguite dall'interruttore aperto stesso.

Inoltre non è fissato un valore preciso della corrente presunta di cortocircuito e di conseguenza, per ogni valore della potenza nominale della batteria, vengono proposti i diversi poteri d'interruzione di ciascun interruttore.

Anche in questo caso, qualora la corrente d'inserzione risulti eccessiva, è necessaria l'installazione di induttanze di limitazione.

Tabella A.5

Interruttore	I_{CBn} [A]	I_{cn} [A]	Q_c [kvar]				N_{mec}	f_{mec} [op/h]	N_{el}	f_{el} [op/h]
			400 V	440 V	500 V	690 V				
X1 B-N	630	421	291	320	364	502	12500	60	6000	30
X1 B-N	800	533	369	406	461	637	12500	60	6000	30
X1 B-N	1000	666	461	507	576	795	12500	60	4000	30
X1 B-N	1250	834	578	636	722	997	12500	60	4000	30
X1 B-N	1600	1067	739	813	924	1275	12500	60	3000	30
E1 B-N	800	533	369	406	461	637	25000	60	10000	30
E1 B-N	1000	666	461	507	576	795	25000	60	10000	30
E1 B-N	1250	834	578	636	722	997	25000	60	10000	30
E1 B-N	1600	1067	739	813	924	1275	25000	60	10000	30
E2 B-N-S	800	533	369	406	461	637	25000	60	15000	30
E2 B-N-S	1000	666	461	507	576	795	25000	60	15000	30
E2 B-N-S	1250	834	578	636	722	997	25000	60	15000	30
E2 B-N-S	1600	1067	739	813	924	1275	25000	60	12000	30
E2 B-N-S	2000	1334	924	1017	1155	1594	25000	60	10000	30
E3 N-S-H-V	800	533	369	406	461	637	20000	60	12000	20
E3 N-S-H-V	1000	666	461	507	576	795	20000	60	12000	20
E3 N-S-H-V	1250	834	578	636	722	997	20000	60	12000	20
E3 N-S-H-V	1600	1067	739	813	924	1275	20000	60	10000	20
E3 N-S-H-V	2000	1334	924	1017	1155	1594	20000	60	9000	20
E3 N-S-H-V	2500	1667	1155	1270	1444	1992	20000	60	8000	20
E3 N-S-H-V	3200	2134	1478	1626	1848	2550	20000	60	6000	20
E4 S-H-V	3200	2134	1478	1626	1848	2550	15000	60	7000	10
E6 H-V	3200	2134	1478	1626	1848	2550	12000	60	5000	10

Appendice B

Potenza reattiva al variare della tensione

La potenza reattiva fornita da una batteria trifase di condensatori connessi a triangolo oppure a stella è data rispettivamente da:

$$Q_{c\Delta} = 3 \cdot \frac{U_n^2}{X_c} \quad Q_{cY} = \frac{U_n^2}{X_c} \quad [B.1]$$

Per variare la potenza reattiva prodotta, fissata la tensione, occorre variare i valori di reattanza capacitiva X_c e quindi delle capacità dei condensatori inseriti. Invece, fissata la capacità della batteria di condensatori, la potenza reattiva varia con il quadrato della tensione.

Difatti effettuando il dimensionamento per avere una prefissata potenza reattiva Q_{c1} ad un valore di tensione U_{n1} , ad un valore U_{n2} la potenza reattiva varia secondo la relazione¹:

$$Q_{c2} = Q_{c1} \cdot \left(\frac{U_{n2}}{U_{n1}} \right)^2 \quad [B.2]$$

valida indipendentemente dal tipo di collegamento della batteria di condensatori.

Invece, se si vuole mantenere costante la potenza reattiva prodotta al variare della tensione, occorre variare la capacità dei condensatori secondo la relazione:

$$C_2 = C_1 \cdot \left(\frac{U_{n1}}{U_{n2}} \right)^2 \quad [B.3]$$

Supponendo una variazione della tensione di alimentazione entro i limiti del $\pm 10\%$ del valore nominale, qualora si voglia il fattore di potenza pari a 0.9 anche al valor minimo di tensione, occorre dimensionare la batteria di condensatori (a parità di potenza reattiva richiesta dal carico) con una capacità pari a circa il 124% di quella che si avrebbe a tensione nominale. Difatti dalla relazione precedente:

$$C_2 = C_1 \cdot \left(\frac{U_{n1}}{0.9 \cdot U_{n1}} \right)^2 \rightarrow C_2 = C_1 \cdot \left(\frac{1}{0.81} \right) \rightarrow C_2 = 1.24 \cdot C_1 \quad [B.4]$$

Con tale valore di capacità occorre tuttavia verificare che nel momento in cui la tensione aumenti del 10% rispetto al valore nominale, la potenza reattiva generata non superi quella richiesta dal carico.

Per far ciò si impone il fattore di potenza² pari a 0.9 quando la tensione è al 90% della tensione nominale e si esprime la potenza attiva P assorbita dal carico, che rimane invariata, in funzione delle potenze reattive Q del carico e di rifasamento Q_c ³:

$$Q - Q_{c_{90\%}} = P \cdot \operatorname{tg}\varphi \rightarrow P = \frac{Q - Q_{c_{90\%}}}{0.49} = \frac{Q - Q_c}{0.49} \quad [B.5]$$

Al 10% di tensione in più con una capacità pari al 24% in più, supponendo una connessione a triangolo, la potenza reattiva risulta pari a:

$$Q_{c_{110\%}} = 3 \cdot \omega \cdot 1.24 \cdot C_1 \cdot (1.1 \cdot V_n)^2 = \dots \quad [B.6]$$

$$\dots \rightarrow 1.24 \cdot 1.1^2 \cdot 3 \cdot \omega \cdot C_1 \cdot V_n^2 = 1.5 \cdot Q_c$$

Per non immettere in rete potenza reattiva deve essere:

$$Q - Q_{c_{110\%}} = P \cdot \operatorname{tg}\varphi' \rightarrow \operatorname{tg}\varphi' = \frac{Q - Q_{c_{110\%}}}{P} > 0 \quad [B.7]$$

Sostituendo P con l'espressione [B.5] ed introducendo la [B.6] si ottiene:

$$\operatorname{tg}\varphi' = \frac{0.49 \cdot (Q - 1.5 \cdot Q_c)}{Q - Q_c} > 0 \quad [B.8]$$

Poiché il denominatore è positivo per dimensionamento, il rapporto è positivo se è positivo il numeratore, ossia:

$$0.49 \cdot (Q - 1.5 \cdot Q_c) > 0 \rightarrow Q_c < 0.66 \cdot Q \quad [B.9]$$

Quindi si determina inizialmente il valore di Q_c per effettuare il rifasamento al valore della tensione nominale; si ricava il corrispondente valore di capacità C_1 e lo si moltiplica per 1.24 per ottenere il reale valore della capacità qualora si voglia rifasare al minimo valore della variazione di tensione; infine tramite la disuguaglianza [B.9] si verifica che per un aumento del 10% della tensione di alimentazione non si abbia immissione di potenza reattiva in rete.

Se si rifasa al 100% della tensione nominale, come usualmente avviene, anziché al 90%, la relazione [B.6] diventa:

$$Q_{c_{100\%}} = 3 \cdot \omega \cdot C_1 \cdot (1.1 \cdot V_n)^2 = 1.21 \cdot Q_c \quad [B.10]$$

e di conseguenza la [B.9], per non immettere potenza reattiva in rete, diventa:

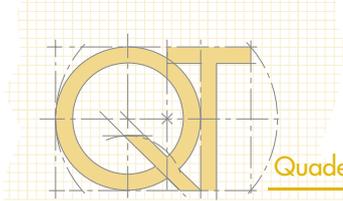
$$0.49 \cdot (Q - 1.21 \cdot Q_c) > 0 \rightarrow Q_c < 0.83 \cdot Q \quad [B.11]$$

¹ $Q_{c1} = 3 \frac{U_{n1}^2}{X_c}$ $Q_{c2} = 3 \frac{U_{n2}^2}{X_c}$

esplicitando la reattanza capacitiva invariante ed uguagliando le due relazioni si ottiene la [B.2]

² $\cos\varphi = 0.9 \rightarrow \operatorname{tg}\varphi = 0.49$

³ $Q_{c_{90\%}} = 3 \cdot \omega \cdot 1.24 \cdot C_1 \cdot (0.9 \cdot V_n)^2 = Q_c$



Appendice C

Filtraggio e rifasamento in regime deformato

C.1 Premessa

Le applicazioni impiantistiche attuali comportano spesso la presenza di carichi non lineari che generano armoniche di corrente e pertanto ci si può trovare nella condizione di dover effettuare un rifasamento in regime non più sinusoidale.

Qualora la presenza delle armoniche raggiunga un livello non più accettabile e di conseguenza si debba prevedere l'inserimento di filtri L-C per compensare una o più di esse, si può sfruttare la contemporanea attitudine al rifasamento alla frequenza fondamentale di tali filtri che, se opportunamente dimensionati, possono fornire integralmente la potenza reattiva richiesta, evitando in tal modo l'installazione di batterie di condensatori dedicate.

Di seguito saranno quindi analizzate e sviluppate, anche attraverso un esempio applicativo, tali condizioni di funzionamento ed il rispettivo dimensionamento dei filtri; per far ciò, saranno preliminarmente introdotte alcune formule e definizioni di grandezze utili per l'analisi in oggetto.

C.2 Analisi grandezze in regime deformato

Una grandezza periodica, generalmente continua e limitata può essere sviluppata in serie di Fourier secondo la relazione:

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cdot \cos nx + b_n \cdot \sin nx) \quad [C.1]$$

dove il primo termine a secondo membro rappresenta il valor medio della funzione nel periodo T, ossia:

$$\frac{a_0}{2} = \frac{1}{T} \int_0^T f(x) \cdot dx \quad [C.2]$$

mentre i coefficienti a_n e b_n della serie sono determinati tramite:

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(x) \cdot \cos nx \cdot dx \quad b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(x) \cdot \sin nx \cdot dx \quad [C.3]$$

Lo sviluppo in serie di Fourier può anche esser espresso in termini di soli coseni nel modo seguente (nel dominio del tempo):

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} A_k \cdot \cos(k\omega t - \vartheta_k) \quad [C.4]$$

Passando da grandezze generiche a grandezze elettriche alternate (valor medio nullo $\frac{a_0}{2} = 0$) quali tensione e corrente, queste, in regime deformato, possono esser espresse nella serie di armoniche con frequenze multiple della fondamentale secondo le relazioni¹:

$$v = \sum_{k=1}^{\infty} \sqrt{2} \cdot V_k \cdot \cos(k\omega t - \vartheta_k) \quad i = \sum_{k=1}^{\infty} \sqrt{2} \cdot I_k \cdot \cos(k\omega t - \vartheta_k - \varphi_k) \quad [C.5]$$

i cui valori efficaci di fase sono definiti come la radice quadrata della somma dei quadrati dei valori efficaci delle singole armoniche:

$$V = \sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} V_k^2} \quad I = \sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} I_k^2} \quad [C.6]$$

Per avere indicazioni circa il contenuto armonico delle forme d'onda della tensione e corrente e per prendere provvedimenti qualora tali valori siano elevati, si definisce il tasso di *distorsione armonica totale THD (Total Harmonic Distorsion)*:

$$THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} I_k^2}}{I_1} \quad THD \text{ in corrente} \quad [C.7]$$

$$THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} V_k^2}}{V_1} \quad THD \text{ in tensione} \quad [C.8]$$

Se $THD_i < 10\%$ e $THD_v < 5\%$ il tasso armonico è considerato modesto e tale da non prendere provvedimenti, mentre in caso contrario si può prevedere l'utilizzo di uno o più filtri per le armoniche di ampiezza maggiore al fine di riportare i valori dei tassi di distorsione armonica entro i limiti accettabili.

¹ L'angolo φ_k rappresenta lo sfasamento della k-esima armonica di corrente rispetto alla k-esima armonica di tensione.

C.3 Potenze in regime deformato

In regime deformato si ha un'estensione della definizione di potenze in regime sinusoidale.

Difatti si definisce la *potenza apparente complessiva* S , indice del cimento termico cui è sottoposto un componente elettrico nel caso trifase, nel modo seguente:

$$S = 3 \cdot V \cdot I = 3 \cdot \sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} V_k^2} \cdot \sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} I_k^2} \quad [C.9]$$

Data la presenza di armoniche di tensione e corrente sovrapposte all'armonica fondamentale, le espressioni delle *potenze attiva* P e *reattiva* Q diventano²:

$$P = 3 \cdot \sum_{k=1}^{\infty} V_k \cdot I_k \cdot \cos \varphi_k \quad Q = 3 \cdot \sum_{k=1}^{\infty} V_k \cdot I_k \cdot \sin \varphi_k \quad [C.10]$$

da cui la *potenza apparente* A con l'usuale definizione:

$$A = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad [C.11]$$

Tale potenza differisce dalla potenza apparente complessiva definita nella [C.9]; in particolare vale la relazione:

$$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2 \quad [C.12]$$

in cui il termine D (definito *potenza deformante*) tiene conto della deformazione delle forme d'onda tensione e corrente³.

La somma dei quadrati della potenza reattiva Q e della potenza deformante D fornisce il quadrato della *potenza non attiva* N :

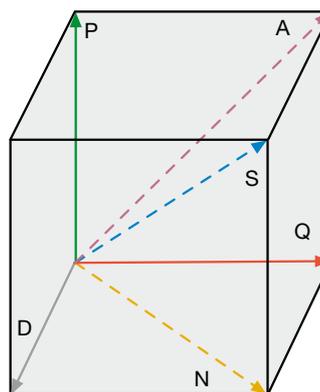
$$N^2 = Q^2 + D^2 \quad [C.13]$$

Definita non attiva perché data anche dalla differenza dei quadrati della potenza apparente complessiva S e della potenza attiva P :

$$N^2 = S^2 - P^2 \quad [C.14]$$

Per chiarire il concetto si può dare l'interpretazione grafica della figura C.1, estensione tridimensionale del triangolo bidimensionale delle potenze in regime sinusoidale. Come si può notare, P , Q e D rappresentano i vertici di un parallelepipedo, che ha in S la sua diagonale principale, in A la diagonale della faccia che ha per spigoli P e Q ed in N la diagonale della faccia che ha per spigoli Q e D .

Figura C.1



Lungo la linea di alimentazione di un utilizzatore funzionante con una potenza attiva P in regime deformato transita la corrente definita nella [C.6] con una tensione definita nella stessa, pertanto il *fattore di sfasamento totale* $\cos \phi$ tra la potenza attiva P ed apparente totale S visto dalla rete è per definizione:

$$\cos \phi = \frac{P}{S} \quad [C.15]$$

Nel rifasamento si fa riferimento a tale grandezza pre-fissando come obiettivo il valore di 0.9; in tal modo, a parità di potenza attiva assorbita dal carico, la potenza apparente totale (e di conseguenza la corrente transitante) vista dalla rete diminuisce. Il fattore di sfasamento totale è un'estensione al regime deformato dell'usuale *fattore di potenza* $\cos \varphi$ del regime sinusoidale, che anche in questo caso vale:

$$\cos \varphi = \frac{P}{A} \quad [C.16]$$

Qualora non vi fosse deformazione nelle forme d'onda di tensione e corrente i fattori che compaiono nelle due equazioni precedenti coinciderebbero; al contrario, in presenza di armoniche, essi differiscono e vale la relazione:

$$\cos \phi = \cos \varphi \cdot \cos \psi \quad [C.17]$$

in cui il *fattore di deformazione* $\cos \psi$ tiene conto della presenza della potenza deformante ed è definito come:

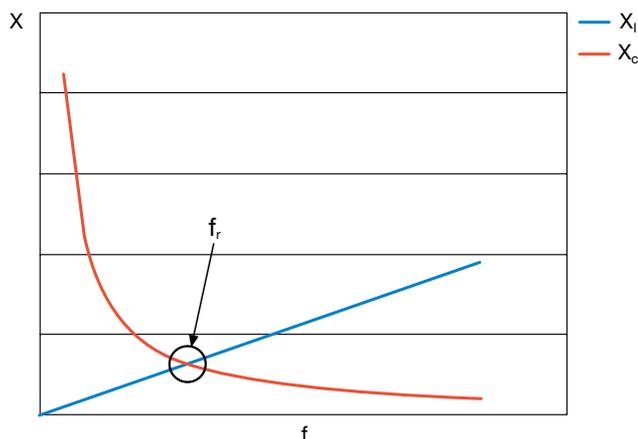
$$\cos \psi = \frac{A}{S} \quad [C.18]$$

² Secondo l'approccio di Budeanu le potenze attiva e reattiva assorbite da un carico in presenza di distorsione armonica sono la sommatoria delle potenze all'armonica k -esima e sono presenti unicamente i prodotti di tensione e corrente della stessa armonica e non prodotti "misti" di armoniche differenti.

³ Le potenze apparenti S ed A differiscono, poiché per definizione la prima tiene anche conto anche dei prodotti "misti" tra armoniche differenti dei valori efficaci di tensione e corrente.

C.4 Filtri L-C funzionanti come condensatori

Prendendo in considerazione un ramo di un filtro L-C serie passivo risonante ad una determinata frequenza, si rappresentano graficamente, come illustrato sotto, la reattanza capacitiva ed induttiva in funzione della frequenza.



Come evidenziato dal grafico, si può constatare che al di sotto della *frequenza di risonanza*⁴ $f_r = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}}$ prevale la reattanza capacitiva e di conseguenza la potenza reattiva prodotta rispetto a quella assorbita, ossia:

$$Q = Q_L - Q_C = \omega \cdot L \cdot I^2 - \frac{1}{\omega \cdot C} \cdot I^2 < 0 \quad [C.19]$$

Pertanto utilizzando filtri passivi per il filtraggio delle armoniche di corrente alle frequenze di risonanza, si ha rifasamento alle frequenze inferiori e di tale effetto occorre tener conto durante il dimensionamento delle batterie dei condensatori dei filtri stessi. In altre parole, nel dimensionamento dei filtri L-C si possono contemporaneamente scegliere dei valori di induttanza e di capacità, tali per cui la somma della potenza reattiva generata all'armonica fondamentale da tutti i filtri installati corrisponda alla potenza reattiva richiesta per portare a 0.9 il fattore di sfasamento totale visto dalla rete a monte.

A frequenze maggiori di quelle di risonanza l'effetto induttivo prevale, ma l'ampiezza delle armoniche presenti nella forma d'onda distorta di corrente, nelle usuali applicazioni impiantistiche, decresce all'aumentare della frequenza; di conseguenza la potenza reattiva assorbita dal filtro al di sopra della frequenza di risonanza decresce

⁴ La frequenza di risonanza è quel determinato valore di frequenza per cui la reattanza induttiva e capacitiva coincidono (vedi cap.8). In formula:

$$X_L = X_C \rightarrow 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C} \rightarrow 4 \cdot \pi^2 \cdot f^2 \cdot L \cdot C = 1 \rightarrow f = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}}$$

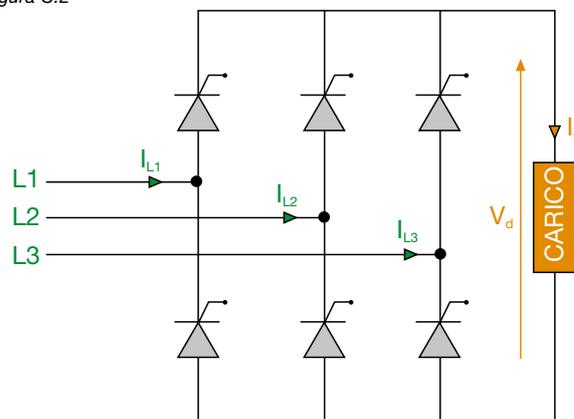
Se l'induttanza e la capacità sono in serie si ha l'annullamento dell'impedenza totale e di conseguenza un corto circuito per l'armonica di corrente avente frequenza pari a quella di risonanza. Dualmente, se l'induttanza e la capacità sono in parallelo si ha che l'impedenza totale tende idealmente all'infinito con conseguente elevata sovratensione ai capi.

all'aumentare dell'ordine di armonicità ed inoltre per frequenze superiori la batteria di rifasamento si presenta alla rete complessivamente come un'induttanza, eliminando la possibilità di risonanza parallelo con l'induttanza di rete.

Esempio applicativo

Si ipotizzi di dover alimentare un raddrizzatore statico trifase a ponte di Graetz totalmente controllato⁵ mediante una rete di alimentazione a 50 Hz con potenza di corto circuito sufficientemente elevata da poter trascurare la distorsione della terna di tensioni causata dalla corrente distorta immessa in rete dal raddrizzatore.

Figura C.2



La corrente in ciascuna fase della linea (ipotizzando un valore elevato dell'induttanza lato continua) ha una forma d'onda rettangolare con frequenza dell'armonica fondamentale pari a quella della tensione sinusoidale. Lo sviluppo in serie di Fourier di tale forma d'onda fornisce solo armoniche⁶ di ordine $k = 6n \pm 1$ ($n = 0, 1, 2, \dots$), la cui ampiezza teorica è inversamente proporzionale all'ordine k di armonicità⁷, ossia:

$$I_k = \frac{I_1}{k} \quad [C.20]$$

dove I_1 è l'ampiezza dell'armonica fondamentale (nel caso in esame 50 Hz).

Poiché per ipotesi iniziale, la forma d'onda di tensione non subisce distorsione il suo sviluppo in serie si riduce unicamente all'armonica fondamentale e di conseguenza

⁵ Ciò significa che, come rappresentato in figura, le valvole al silicio sono tutte tiristori, i quali possono essere comandati con un ritardo in chiusura (angolo di controllo di fase α); in tal modo è possibile variare il valore della tensione raddrizzata V_d ed i valori di potenza P secondo le relazioni:

$$V_d = V_{do} \cdot \cos \alpha \quad P = P_{do} \cdot \cos \alpha$$

dove V_{do} e P_{do} sono rispettivamente il valor medio della tensione raddrizzata e la potenza lato continua in assenza di controllo di fase ($\alpha = 0$).

L'effetto lato alternata dell'angolo di controllo di fase α è di causare uno sfasamento φ tra tensione e corrente, il che comporta un assorbimento di potenza reattiva Q . In particolare vale la relazione ($\alpha = \varphi$).

⁶ Ciò dipende dalla tipologia del ponte raddrizzatore (monofase, trifase, esafase...) e dal tipo di controllo (non controllato, semi-controllato o ibrido, totalmente controllato).

⁷ Nella realtà la commutazione non istantanea ed un angolo di controllo di fase non nullo riducono l'ampiezza delle armoniche rispetto al valore teorico.

le potenze attiva e reattiva assorbite dal raddrizzatore (supposto senza perdite), calcolate secondo le [C.10] sono pari a⁸:

$$P = 3 \cdot \sum_{k=1}^{\infty} V_k \cdot I_k \cdot \cos \varphi_k = 3 \cdot V_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1 = P_1 = V_{do} \cdot I_d \cdot \cos \alpha = P_d \quad [C.21]$$

$$Q = 3 \cdot \sum_{k=1}^{\infty} V_k \cdot I_k \cdot \sin \varphi_k = 3 \cdot V_1 \cdot I_1 \cdot \sin \varphi_1 = 3 \cdot V_1 \cdot I_1 \cdot \sin \alpha = Q_1 \quad [C.22]$$

dove:

V_{do} valore della tensione lato continua;

I_d valore della corrente lato continua.

A tali potenze corrisponde una potenza apparente:

$$A = \sqrt{P_1^2 + Q_1^2} = A_1 \quad [C.23]$$

Poiché la potenza apparente complessiva vista dalla rete di alimentazione è pari a:

$$S = 3 \cdot V \cdot I = 3 \cdot \sqrt{V_1^2 \cdot \sum_{k=1}^{\infty} I_k^2} \quad [C.24]$$

vi è la presenza di una potenza deformante dovuta alla forma d'onda distorta di corrente:

$$D = \sqrt{S^2 - A_1^2} \quad [C.25]$$

Si supponga che il ponte raddrizzatore abbia una potenza nominale P_{do} fornita lato continua pari a 140 kW, alimentato da una rete a tensione nominale non distorta $U_n = 400$ V.

Supponendo che la commutazione sia istantanea e che l'angolo di controllo di fase α sia tale per cui $\cos \varphi = \cos \alpha = 0.8$ si ottengono i seguenti valori di potenze lato alternata:

$$P = P_d = P_{do} \cdot \cos \alpha = 140 \cdot 0.8 = 112 \text{ kW}$$

da cui una corrente di prima armonica:

$$I_1 = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot \cos \varphi} = \frac{112 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0.8} = 202 \text{ A}$$

e di conseguenza una potenza reattiva ed apparente⁹:

$$Q = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_1 \cdot \sin \varphi = \sqrt{3} \cdot 400 \cdot 202 \cdot 0.6 = 84 \text{ kvar}$$

$$A = \sqrt{P^2 + Q^2} = 140 \text{ kVA}$$

⁸ Non essendoci armoniche di ordine superiore nella tensione, sono nulli tutti gli addendi della sommatoria per $k > 1$. Inoltre, poiché l'angolo di sfasamento φ e l'angolo di controllo di fase α (istante in cui si comandano in chiusura i tiristori) coincidono, si può constatare come aumentando quest'ultimo aumenta l'assorbimento di potenza reattiva da parte del ponte.

⁹ $\cos \varphi = 0.8 \rightarrow \varphi = 36.9^\circ \rightarrow \sin \varphi = 0.6$

Sviluppando in serie di Fourier la forma d'onda distorta della corrente lato alternata si ottengono, secondo la [C.20] i seguenti valori delle ampiezze delle armoniche (considerando fino alla 25^a armonica):

Tabella C.1

k	I_k [A]	I_k/I_1 %
1	202	100
5	40	20
7	29	14
11	18	9
13	15	8
17	12	6
19	11	5
23	9	4
25	8	4

Pertanto nella rete a monte circolerebbe, in assenza di filtri per le armoniche, una corrente avente valore efficace totale pari alla radice quadrata della somma dei quadrati dei valori efficaci delle varie armoniche forniti nella precedente tabella:

$$I = \sqrt{\sum_{k=1}^{25} I_k^2} = 210 \text{ A}$$

con una potenza apparente complessiva:

$$S = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I = \sqrt{3} \cdot 400 \cdot 210 = 146 \text{ kVA}$$

ed un tasso di distorsione armonica complessivo che risulta pari a:

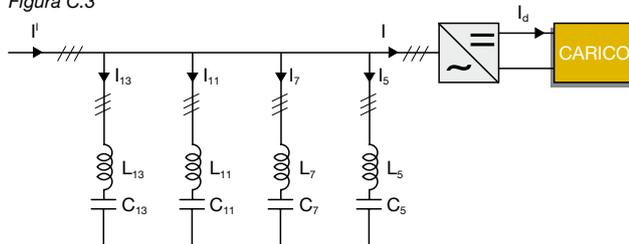
$$\text{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{k=5}^{25} I_k^2}}{I_1} = 29\%$$

Di conseguenza si avrebbero un fattore di deformazione $\cos \psi = \frac{A}{S} = 0.96$ ed un fattore di sfasamento visto dalla rete a monte $\cos \phi = \cos \varphi \cdot \cos \psi = 0.8 \cdot 0.96 = 0.77$.

L'obiettivo che ci si prefigge è di ottenere un fattore di sfasamento complessivo pari a $\cos \phi' = 0.9$ e si ipotizza a tal fine di dimensionare ed inserire in parallelo dei filtri L-C

per la 5^a, 7^a, 11^a e 13^a armonica come rappresentato nella figura seguente.

Figura C.3



Il valore del $\cos\varphi'$ finale sarà pertanto maggiore di 0.9. Ipotizzando di fissare tale valore a 0.91, si ottiene una potenza reattiva di rifasamento pari a:

$$Q_c = P \cdot (\operatorname{tg}\varphi - \operatorname{tg}\varphi') = 112 \cdot (\operatorname{tg}(\cos^{-1}(0.8)) - \operatorname{tg}(\cos^{-1}(0.91))) = 33 \text{ kvar}$$

da cui la potenza reattiva Q' finale effettuato il rifasamento:

$$Q' = Q - Q_c = 84 - 33 = 51 \text{ kvar}$$

Procedendo per tentativi ed impostando dei valori di induttanza alle armoniche che si vogliono filtrare, si ottengono i seguenti valori di capacità che causano risonanza serie:

$$C_k = \frac{1}{(2\pi f)^2 \cdot L_k}$$

Tabella C.2

k	f [Hz]	L _k [mH]	C _k [μF]
5	250	1	406
7	350	2	103
11	550	1	84
13	650	1	6

La potenza reattiva a 50 Hz fornita ad esempio dal filtro L-C risonante alla quinta armonica è calcolata nel modo seguente:

$$I_{1,5} = \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot \left(2\pi \cdot 50 \cdot L_5 - \frac{1}{2\pi \cdot 50 \cdot C_5} \right)}$$

$$Q_{1,5} = 3 \cdot \left(\frac{1}{2\pi \cdot 50 \cdot C_5} - 2\pi \cdot 50 \cdot L_5 \right) \cdot I_{1,5}^2$$

In modo analogo si calcolano i contributi delle altre armoniche. La somma delle potenze reattive di rifasamento a 50Hz è molto prossima a quella prestabilita (con i valori di induttanza e capacità forniti in tabella C.2); considerando il valore della potenza apparente A' (a parità di potenza attiva P assorbita):

$$A' = \sqrt{P^2 + Q'^2} = 123 \text{ kVA}$$

il valore efficace della corrente di prima armonica diventa pari a:

$$I_1' = \frac{A'}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{123 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 400} = 177 \text{ A}$$

che è circa il 12% inferiore rispetto al valore iniziale di I_1 , cui corrispondono i valori di corrente delle armoniche non filtrate:

Tabella C.3

k	I _k [A]	I _k /I ₁ %
17	10	6
19	9	5
23	8	4
25	7	4

Come si può constatare confrontando i valori assoluti dei valori efficaci delle tabelle C.1 e C.3, il rifasamento a 50 Hz determina una riduzione del valore efficace della prima armonica di corrente, il che si riflette sulla riduzione delle armoniche non filtrate (poiché $I_k' = \frac{I_k}{k}$). Ciò comporta altresì un'ulteriore diminuzione della corrente totale vista dalla rete a monte che diventa pari a $I' = 178 \text{ A}$ (16% in meno della corrente totale iniziale I) con una potenza apparente complessiva S' :

$$S' = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I' = \sqrt{3} \cdot 400 \cdot 178 = 124 \text{ kVA}$$

Il fattore di deformazione passa da 0.96 a:

$$\cos\psi' = \frac{A'}{S'} = \frac{123}{124} = 0.99$$

ed il fattore di sfasamento complessivo risulta:

$$\cos\phi' = \cos\varphi' \cdot \cos\psi' = 0.91 \cdot 0.99 = 0.906$$

Si è pertanto raggiunto l'obiettivo che ci si era prefisso, altrimenti si avrebbe dovuto aumentare il valore impostato di $\cos\varphi'$ e ripetere interamente il procedimento precedente.

Il tasso di distorsione armonica complessiva diminuisce a $\text{THD}' = 9.6\%$ (inferiore al 10% auspicabile).

Concludendo, attraverso questo esempio si è potuto constatare come in regime deformato, dimensionando opportunamente le induttanze e le capacità dei filtri passivi si possono ottenere due ulteriori effetti oltre al filtraggio delle armoniche per il quale sono inseriti i filtri stessi:

- rifasamento canonico a 50Hz, poiché alla frequenza fondamentale prevale l'effetto capacitivo rispetto a quello induttivo e conseguentemente la potenza reattiva generata rispetto a quella assorbita;
- riducendo, attraverso il rifasamento, il valore efficace dell'armonica fondamentale della corrente, si riducono di conseguenza anche i valori efficaci delle armoniche non filtrate; pertanto si ha un'ulteriore diminuzione della corrente totale circolante in rete e del THD complessivo, il che significa una riduzione della deformazione della forma d'onda della corrente stessa.

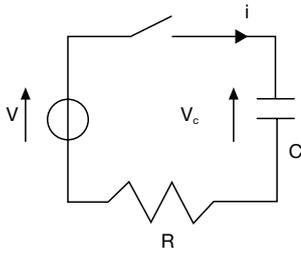
Appendice D

Tensioni e correnti d'inserzione e scarica dei condensatori

D.1 Inserzione batteria di condensatori

Si consideri il circuito equivalente monofase serie di una capacità e la resistenza dei cablaggi come indicato nello schema seguente:

Figura D.1



con:

$$v = \sqrt{2} \cdot V_m \cdot \sin(\omega t + \psi) \quad [D.1]$$

vale l'equazione:

$$R \cdot i + \frac{1}{C} \cdot \int_0^t i dt = \sqrt{2} \cdot V_m \cdot \sin(\omega t + \psi) \quad [D.2]$$

Ponendo come incognita la tensione sul condensatore v_c e sapendo che $i = i_c = C \cdot \frac{dv_c}{dt}$ si ha:

$$R \cdot C \cdot \frac{dv_c}{dt} + v_c = \sqrt{2} \cdot V_m \cdot \sin(\omega t + \psi) \quad [D.3]$$

La soluzione della precedente equazione differenziale lineare del primo ordine è la somma di due componenti, la soluzione a regime v_c^i (*integrale particolare*) ed una componente unidirezionale ad esponenziale smorzato v_c'' (*integrale generale*), ossia:

$$v_c = v_c^i + v_c'' \quad [D.4]$$

da cui:

$$R \cdot C \cdot \frac{dv_c^i}{dt} + v_c^i = \sqrt{2} \cdot V_m \cdot \sin(\omega t + \psi) \quad R \cdot C \cdot \frac{dv_c''}{dt} + v_c'' = 0 \quad [D.5]$$

Poiché a regime la corrente circolante nel circuito è la seguente¹:

$$i^i = \sqrt{2} \cdot I \cdot \sin(\omega t + \psi + \varphi) \quad [D.6]$$

¹ $I = \frac{V_m}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}}$

dalla prima equazione delle [D.5] si ottiene la tensione a regime sul condensatore:

$$v_c^i = \frac{1}{C} \cdot \int_0^t i^i dt = -\frac{\sqrt{2} \cdot I}{\omega \cdot C} \cdot \cos(\omega t + \psi + \varphi) \quad [D.7]$$

Per la tensione v_c'' si ha²:

$$v_c'' = V_c'' \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad [D.8]$$

Imponendo come condizioni iniziali la tensione nulla sul condensatore per $t=0$:

$$v_{c0} = v_{c0}^i + v_{c0}'' = -\frac{\sqrt{2} \cdot I}{\omega \cdot C} \cdot \cos(\psi + \varphi) + V_c'' = 0 \quad [D.9]$$

da cui:

$$V_c'' = \frac{\sqrt{2} \cdot I}{\omega \cdot C} \cdot \cos(\psi + \varphi) \quad [D.10]$$

e pertanto:

$$v_c = \frac{\sqrt{2} \cdot I}{\omega \cdot C} \cdot \left[\cos(\psi + \varphi) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} - \cos(\omega t + \psi + \varphi) \right] \quad [D.11]$$

In modo analogo, anche per la corrente si ha la somma delle componenti di regime e transitoria:

$$i = i^i + i'' \quad [D.12]$$

La componente di regime è data dalla [D.6], mentre la componente transitoria si ricava derivando rispetto al tempo la [D.8], ossia:

$$i'' = C \cdot \frac{dv_c''}{dt} = C \cdot \frac{\sqrt{2} \cdot I}{\omega \cdot C} \cdot \cos(\psi + \varphi) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \cdot \left(-\frac{1}{R \cdot C} \right) = \dots \leftarrow$$

$$\dots \rightarrow -\frac{\sqrt{2} \cdot I}{\omega \cdot R \cdot C} \cdot \cos(\psi + \varphi) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

da cui:

$$i = \sqrt{2} \cdot I \cdot \left[-\frac{1}{\omega \cdot R \cdot C} \cdot \cos(\psi + \varphi) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} + \sin(\omega t + \psi + \varphi) \right] \quad [D.14]$$

La componente unidirezionale si annulla quando:

$$\cos(\psi + \varphi) = 0 \rightarrow \psi = 90^\circ - \varphi$$

ossia quando l'angolo d'inserzione della tensione è complementare all'angolo di sfasamento tra tensione e corrente a regime. In tal caso non si hanno picchi di corrente e sovratensioni di inserzione. Al contrario se:

$$\cos(\psi + \varphi) = 1 \rightarrow \psi = -\varphi$$

si avrà il massimo valore della componente unidirezionale con il massimo picco di corrente e la maggior sovratensione.

² Di definisce τ la costante di tempo del sistema in oggetto pari a $\tau = RC$

Esempio

Si supponga di voler inserire una batteria trifase di condensatori connessi a stella da 50 kvar alimentata da una rete a potenza infinita a 400 V @ 50 Hz e da un cavo tripolare in PVC di lunghezza 10 m. La capacità per fase risulta pari a:

$$Q_c = 3 \cdot \omega \cdot C \cdot \left(\frac{U_n}{\sqrt{3}}\right)^2 \rightarrow C = \frac{Q_c}{\omega \cdot U_n^2} = \frac{50 \cdot 10^3}{314 \cdot 400^2} = 1 \text{ mF}$$

Il valor efficace della corrente nominale assorbita a regime è:

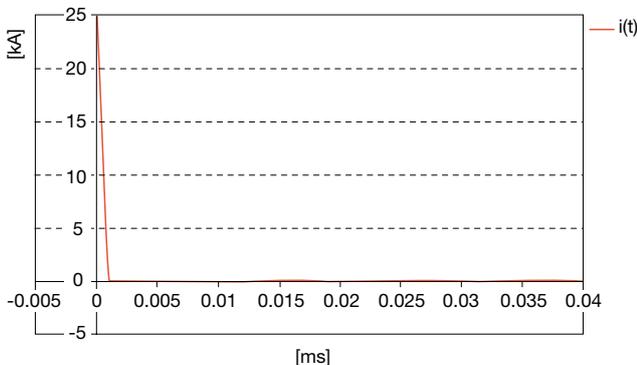
$$I_n = \frac{Q_c}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{5 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 400} = 72 \text{ A}$$

Con tale valore di corrente nominale si sceglie un cavo posato su passerella da 16 mm² avente una resistenza complessiva per fase pari a 15 mΩ. Pertanto la costante di tempo τ del circuito RC è di 15 μs, mentre l'angolo di sfasamento fra corrente e tensione risulta:

$$\varphi = \text{tg}^{-1}\left(\frac{1}{\omega \cdot R \cdot C}\right) = \text{tg}^{-1}\left(\frac{1}{314 \cdot 15 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{-3}}\right) = 89.73^\circ \text{ (anticipo)}$$

Inserendo i valori di resistenza, capacità e di I_n al posto della I (errore trascurabile) nella [D.13] si ottiene che il picco massimo della corrente di inserzione (ipotizzando ψ = -φ) è di circa 22 kA, ossia pari a circa 300 volte la corrente nominale della batteria, come rappresentato nel grafico seguente. Nella realtà impiantistica, l'impedenza della rete a monte contribuisce a limitare tale picco. Qualora risultasse comunque troppo elevato per le apparecchiature elettriche inserite, occorrerebbe interporre delle ulteriori induttanze limitatrici come suggerito nel capitolo 9.

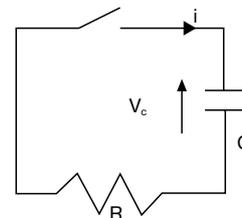
Picco massimo della corrente d'inserzione della batteria



D.2 Scarica dei condensatori

Si consideri un condensatore carico ad una tensione iniziale V_{c0} collegato ad una resistenza di scarica R come indicato nello schema seguente:

Figura D.2



In assenza di una tensione impressa, si può scrivere in funzione della tensione sul condensatore:

$$R \cdot C \cdot \frac{dv_c}{dt} + v_c = 0 \tag{D.15}$$

la cui soluzione fornisce:

$$v_c = V_{c0} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \tag{D.16}$$

che nel caso peggiore diventa:

$$v_c = \sqrt{2} \cdot V_n \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \tag{D.17}$$

Inoltre, sapendo che $i = i_c = C \frac{dv_c}{dt}$, si ha per la corrente:

$$i = -\frac{V_{c0}}{R} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \tag{D.18}$$

Ponendo nella [D.17], in base alle prescrizioni della norma CEI EN 60831-1, t=180 s, v_c=75 V e risolvendo rispetto ad R, si trova il valor massimo della resistenza di scarica come indicato nella formula [9.12] del capitolo 9.

Esempio

Si supponga di voler dimensionare le resistenze di scarica per la batteria di condensatori dell'esempio precedente. Partendo dalla [D.17] e sostituendo i valori in oggetto si ha (ponendo il coefficiente k = 1):

$$75 \geq \sqrt{2} \cdot 230 \cdot e^{-\frac{3 \cdot 60}{R \cdot 10^{-3}}} \rightarrow R \leq \frac{180}{10^{-3} \cdot \ln\left(\frac{\sqrt{2} \cdot 230}{75}\right)} = 123 \text{ k}\Omega$$

Scegliendo una resistenza di valore pari a quello indicato, poiché in 3 min dissipa in calore l'energia elettrostatica accumulata da ciascun condensatore, la potenza massima sviluppata risulta:

$$P = \frac{V_{c0}^2}{R} = \frac{(\sqrt{2} \cdot 230)^2}{123 \cdot 10^3} = 0.86 \text{ W}$$

Come si può notare, nonostante il valore di resistenza dell'ordine delle centinaia di kΩ, la potenza massima dissipata in calore è minore di 1 W, poiché il valore massimo della corrente di scarica è di circa:

$$I = \frac{V_{c0}}{R} = \frac{\sqrt{2} \cdot 230}{123 \cdot 10^3} = 2.6 \text{ mA}$$

Ciò comporta una limitata sezione dei cavi di collegamento e limitati fenomeni termici.

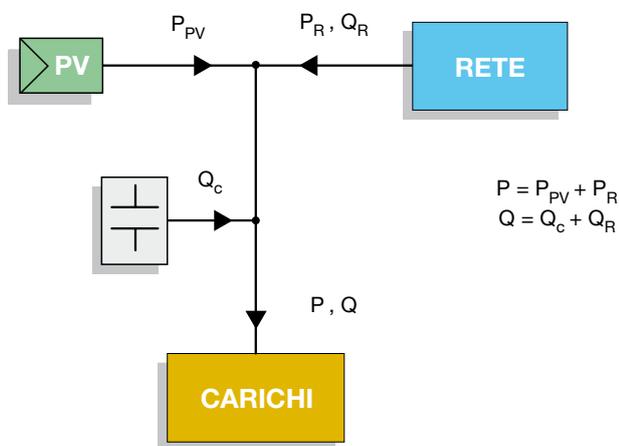
Appendice E

Rifasamento in un impianto fotovoltaico

Un impianto fotovoltaico fornisce generalmente soltanto potenza attiva, per cui occorre comunque prelevare dalla rete la potenza reattiva necessaria ai carichi dell'impianto utilizzatore.

Qualora si aggiunga un impianto fotovoltaico ad uno utilizzatore preesistente, la potenza reattiva prelevata dalla rete rimane la stessa, mentre quella attiva si riduce della quota parte che viene fornita dal generatore fotovoltaico, come indicato nella figura seguente:

Figura E.1



Dal punto di vista della rete l'impianto d'utente nel suo complesso (generatore fotovoltaico e impianto utilizzatore) deve avere, per non incorrere in penali, un fattore di potenza medio pari a 0.9 da cui:

$$\cos \varphi_R \geq 0.9 \rightarrow \operatorname{tg} \varphi_R \leq 0.5 \rightarrow \frac{Q_R}{P_R} \leq 0.5 \quad [E.1]$$

Tenendo conto delle indicazioni in figura, la formula precedente può essere riscritta come:

$$\frac{Q - Q_C}{P - P_{PV}} \leq 0.5 \quad [E.2]$$

da cui:

$$Q_C \geq Q - 0.5 \cdot (P - P_{PV}) = P \cdot \left(\operatorname{tg} \varphi_1 - 0.5 \cdot \left(1 - \frac{P_{PV}}{P} \right) \right) = \dots \quad [E.3]$$

$\dots \rightarrow P \cdot (\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2)$

dove:

$$\operatorname{tg} \varphi_2 = 0.5 \cdot \left(1 - \frac{P_{PV}}{P} \right) \quad [E.4]$$

In assenza dell'impianto fotovoltaico ($P_{PV} = 0$):

$$\operatorname{tg} \varphi_2 = 0.5 \cdot \left(1 - \frac{0}{P} \right) = 0.5 \rightarrow \cos \varphi_2 = 0.9 \quad [E.5]$$

per cui il regolatore del fattore di potenza viene impostato canonicamente a 0.9.

In presenza dell'impianto fotovoltaico viene generata potenza attiva ed il regolatore del fattore di potenza dovrà essere impostato ad un valore maggiore di 0.9. Infatti se ad esempio la potenza generata è pari alla metà di quella assorbita dai carichi ($P_{PV} = 0.5 \cdot P$), si avrà:

$$\operatorname{tg} \varphi_2 = 0.5 \cdot \left(1 - \frac{0.5 \cdot P}{P} \right) = 0.25 \rightarrow \cos \varphi_2 = 0.97 \quad [E.6]$$

Al limite, se l'impianto fotovoltaico fornisce tutta la potenza attiva richiesta dai carichi ($P_{PV} = P$), si dovrà impostare il regolatore del fattore di potenza ad un valore pari a:

$$\operatorname{tg} \varphi_2 = 0.5 \cdot \left(1 - \frac{P}{P} \right) = 0 \rightarrow \cos \varphi_2 = 1 \quad [E.7]$$

e di conseguenza la batteria di condensatori dovrà fornire tutta la potenza reattiva richiesta dai carichi.

Appendice F

Armoniche nei sistemi trifase con neutro

F.1 Premessa

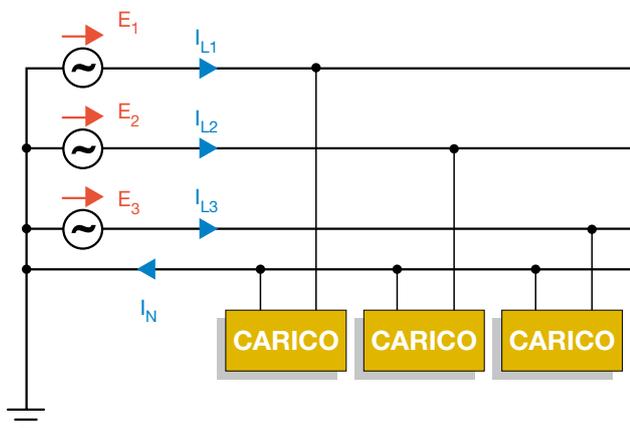
Nei sistemi trifase con neutro possono esserci applicazioni impiantistiche che comportano la circolazione nel conduttore di neutro di una corrente avente valore efficace superiore a quello delle correnti di fase.

Da ciò nasce la necessità di dimensionare il conduttore di neutro con una sezione maggiore rispetto a quella delle fasi e di realizzare un settaggio differente tra le protezioni di sovraccarico delle fasi e del neutro negli interruttori automatici tetrapolari.

Pertanto, l'utilizzo di filtri per armoniche e le tecniche di rifasamento precedentemente illustrate contribuiscono anche a ridurre l'entità della corrente nel neutro, il cui rapporto con la corrente nelle fasi sarà analizzato per diverse condizioni di inquinamento armonico nei casi seguenti.

F.2 Sistema di alimentazione trifase simmetrico e tre carichi monofase equilibrati ma non lineari

Figura F.1



Si consideri la presenza nelle tre correnti di fase della sola terza armonica, oltre alla fondamentale, con un valore fornito dalla norma CEI EN 60947-2 Appendice F opzione b):

$$\bullet \quad I_3 = 0.6 \cdot I_1$$

Il valore efficace della corrente di fase in funzione della prima armonica risulta:

$$I_{L1} = I_{L2} = I_{L3} = I_L = \sqrt{I_1^2 + I_3^2} = \sqrt{I_1^2 \cdot (1 + 0.6^2)} = 1.17 \cdot I_1 \quad [F.1]$$

Nel neutro circola una corrente pari alla somma algebrica dei valori efficaci delle tre componenti di terza armonica che sono in fase tra loro:

$$I_N = 3 \cdot I_3 = 3 \cdot 0.6 \cdot I_1 = 1.8 \cdot I_1 \quad [F.2]$$

da cui esprimendo la corrente nel neutro in funzione della corrente di fase risulta:

$$I_N = 1.8 \cdot I_1 = 1.8 \cdot \frac{I_L}{1.17} = 1.54 \cdot I_L \approx 160\% I_L \quad [F.3]$$

Assumendo invece come valore assunto dalla terza armonica quello indicato nella norma CEI EN 60947-2 Appendice F opzione a):

$$\bullet \quad I_3 = 0.88 \cdot I_1$$

le relazioni precedenti diventano:

$$I_{L1} = I_{L2} = I_{L3} = I_L = \sqrt{I_1^2 + I_3^2} = \sqrt{I_1^2 \cdot (1 + 0.88^2)} = 1.33 \cdot I_1 \quad [F.4]$$

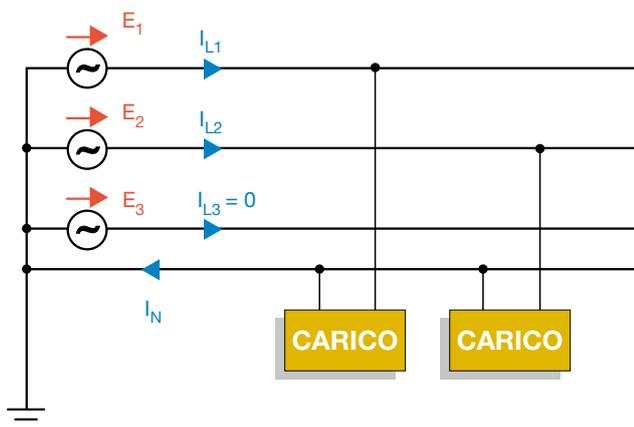
$$I_N = 3 \cdot I_3 = 3 \cdot 0.88 \cdot I_1 = 2.64 \cdot I_1 \quad [F.5]$$

$$I_N = 2.64 \cdot I_1 = 2.64 \cdot \frac{I_L}{1.33} = 1.98 \cdot I_L \approx 200\% I_L \quad [F.6]$$

Come si può notare nel neutro può circolare una corrente anche doppia di quella di fase con la conseguente ripercussione sul dimensionamento della sezione del conduttore e sui settaggi delle protezioni da sovraccarico. Il rapporto tra la corrente nel neutro e nella fase tenderebbe ad aumentare qualora fossero presenti anche armoniche multiple della terza. Invece, aver ipotizzato l'assenza di altre armoniche non multiple della terza è una situazione peggiorativa, in quanto la loro presenza ridurrebbe il rapporto precedente dato che tali armoniche non circolerebbero nel neutro essendo terne simmetriche equilibrate.

F.3 Sistema di alimentazione trifase simmetrico e due carichi monofase equilibrati ma non lineari

Figura F.2



Si consideri dapprima la presenza della sola terza armonica oltre alla fondamentale. Rispetto al caso precedente, ora la corrente circolante nel neutro è la radice quadrata della somma del quadrato della componente fondamentale e del quadrato della somma delle due terze armoniche, ossia:

$$I_N = \sqrt{I_1^2 + (2 \cdot I_3)^2} \quad [F.7]$$

In questo caso particolare, la componente fondamentale della corrente nel neutro è la somma vettoriale delle componenti fondamentali nelle fasi; poiché queste ultime sono uguali in modulo e sfasate di 120° , la somma fornisce come valore efficace risultante quello della componente fondamentale di fase stessa.

Assumendo per ipotesi $I_3 = 0.88 \cdot I_1$ (che si può verificare nei ponti raddrizzatori monofase), si ha:

$$I_N = \sqrt{I_1^2 + (2 \cdot 0.88 \cdot I_1)^2} = I_1 \cdot \sqrt{1 + (2 \cdot 0.88)^2} = 2.02 \cdot I_1 \quad [F.8]$$

$$I_{L1} = I_{L2} = I_L = \sqrt{I_1^2 + I_3^2} = \sqrt{I_1^2 \cdot (1 + 0.88^2)} = 1.33 \cdot I_1 \quad [F.9]$$

$$I_N = \frac{2.02}{1.33} \cdot I_L = 1.52 \cdot I_L \quad [F.10]$$

In presenza anche della quinta e settima armonica con i seguenti valori forniti dalla norma CEI EN 60947-2 Appendice F:

- $I_5 = 0.55 \cdot I_1$
- $I_7 = 0.07 \cdot I_1$

il rapporto tra la corrente nel neutro e quella nella fase diventa:

$$I_N = I_1 \cdot \sqrt{1 + (2 \cdot 0.88)^2 + 0.55^2 + 0.07^2} = 2.1 \cdot I_1 \quad [F.11]$$

$$I_{L1} = I_{L2} = I_L = I_1 \cdot \sqrt{1 + 0.88^2 + 0.55^2 + 0.07^2} = 1.44 \cdot I_1 \quad [F.12]$$

$$I_N = \frac{2.1}{1.44} \cdot I_L = 1.46 \cdot I_L \quad [F.13]$$

Come si può notare confrontando la [F.13] con la [F.10], anche in tal caso la presenza di armoniche non multiple della terza riduce il rapporto tra la corrente nel neutro e quella nella fase.

Glossario

I	valore efficace della corrente totale
I_r	componente della corrente in fase con la tensione
I_q	componente della corrente in quadratura con la tensione
I_1	valore efficace della prima armonica di corrente
I_k	valore efficace dell'armonica k-esima di corrente
U	valore efficace della tensione concatenata
V	valore efficace della tensione di fase totale
V_1	valore efficace della prima armonica tensione
V_k	valore efficace dell'armonica k-esima di tensione
P	potenza attiva assorbita dal carico
Q	potenza reattiva assorbita dal carico
Q_1	potenza reattiva totale prima del rifasamento
Q_2	potenza reattiva totale dopo il rifasamento
A	potenza apparente assorbita dal carico
D	potenza deformante
N	potenza non attiva
S	potenza apparente complessiva
S_1	potenza apparente complessiva prima del rifasamento
S_2	potenza apparente complessiva dopo il rifasamento
Q_c	potenza reattiva della batteria di condensatori
I_{cn}	corrente nominale del condensatore
I_{cmax}	corrente massima assorbita dal condensatore
$\cos\varphi$	fattore di potenza
$\cos\psi$	fattore di deformazione
$\cos\phi$	fattore di sfasamento
$\cos\varphi_1$	fattore di potenza antecedente al rifasamento
$\cos\varphi_2$	fattore di potenza successivo al rifasamento
THD	tasso totale di distorsione armonica
f_r	frequenza di risonanza
P_{PV}	potenza attiva fornita da un generatore fotovoltaico
P_R	potenza attiva fornita dalla rete
Q_R	potenza reattiva fornita dalla rete

Quaderni di Applicazione Tecnica

QT1

La selettività in bassa tensione con interruttori ABB

Low voltage selectivity with ABB circuit-breakers

QT7

**Il motore asincrono trifase
Generalità ed offerta ABB per il coordinamento delle protezioni**

Three-phase asynchronous motors
Generalities and ABB proposals for the coordination of protective devices

QT2

Cabine MT/BT teoria ed esempi di calcolo

MV/LV transformer substations: theory and examples of short-circuit calculation

QT8

Rifasamento e filtraggio delle armoniche negli impianti elettrici

Power factor correction and harmonic filtering in electrical plants

QT3

Sistemi di distribuzione e protezione contro i contatti indiretti ed i guasti di terra

Distribution systems and protection against indirect contact and earth fault

QT9

La comunicazione via Bus con gli interruttori ABB

Bus communication with ABB circuit-breakers

QT4

Gli interruttori ABB nei quadri di bassa tensione

ABB circuit-breakers inside LV switchboards

QT10

Impianti fotovoltaici

Photovoltaic plants

QT5

Interruttori ABB per applicazioni in corrente continua

ABB circuit-breakers for direct current applications

QT11

Guida alla realizzazione di un quadro elettrico secondo le Norme CEI EN 61439 Parte 1 e Parte 2

Guidelines to the construction of a low-voltage switchgear and controlgear assembly complying with the Standards IEC 61439 Part 1 and Part 2

QT6

Quadri per bassa tensione a tenuta d'arco interno

Arc-proof low voltage switchgear and controlgear assemblies

Contatti

ABB SACE

Una divisione di ABB S.p.A.

Interruttori B.T.

Via Baioni, 35

24123 Bergamo

Tel.: 035 395 111

Fax: 035 395306-433

bol.it.abb.com

www.abb.com

Dati e immagini non sono impegnativi. In funzione dello sviluppo tecnico e dei prodotti, ci riserviamo il diritto di modificare il contenuto di questo documento senza alcuna notifica.

Copyright 2010 ABB. All right reserved.