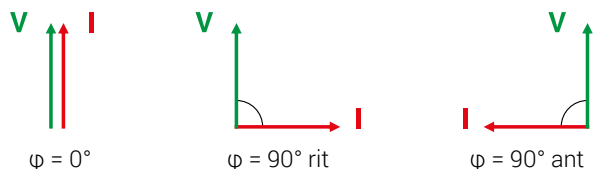


# NOTE TECNICHE

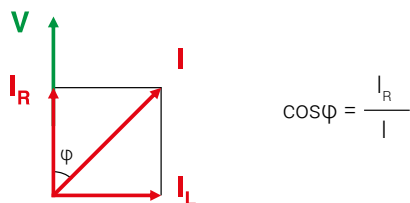
## Rifasare: perchè?

Nei circuiti elettrici la corrente è in fase con la tensione quando siamo in presenza di un carico ohmico (resistenze), mentre è sfasata in ritardo se il carico è induttivo (motori, trasformatori a vuoto) ed in anticipo se il carico è capacitivo (condensatori).



La corrente totale assorbita ad esempio da un motore è determinata dalla somma vettoriale di:

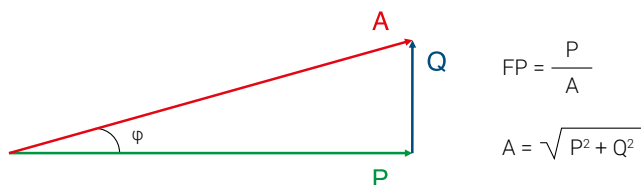
- $I_R$  corrente ohmica dovuta alla componente resistiva del carico;
- $I_L$  corrente reattiva dovuta alla componente induttiva del carico;



A queste correnti sono associate le seguenti potenze:

- **Potenza attiva** associata alla parte resistiva del carico;
- **Potenza reattiva** associata alla parte induttiva del carico;

La potenza reattiva induttiva avendo valore medio nullo nel periodo non è utile ai fini della produzione di lavoro meccanico e costituisce un carico supplementare per il fornitore di energia, che lo impegna a sovradimensionare i propri generatori e le reti di trasmissione e distribuzione. Il parametro che definisce l'assorbimento di potenza reattiva induttiva è il fattore di potenza. Si definisce fattore di potenza il rapporto tra potenza attiva e potenza apparente:



In assenza di armoniche, il fattore di potenza equivale al coseno dell'angolo compreso fra il vettore corrente ed il vettore tensione ( $\cos\phi$ ). Il  $\cos\phi$  diminuisce all'aumentare della potenza reattiva assorbita. Un impianto funzionante a basso  $\cos\phi$ , presenta i seguenti svantaggi:

- Elevate perdite di potenza nella trasmissione nelle linee elettriche;
- Elevate cadute di tensione;
- Maggior dimensionamento degli impianti di generazione, trasporto e trasformazione.

Da quanto esposto si capisce l'importanza di ovviare o almeno ridimensionare gli effetti di un basso fattore di potenza.

I condensatori servono a raggiungere questo risultato.

## Rifasare: come?

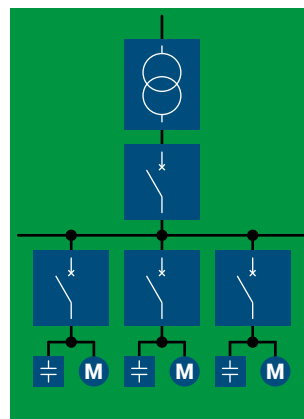
Installando una batteria di condensatori è possibile ridurre la potenza reattiva assorbita dai carichi induttivi presenti nell'impianto e conseguentemente innalzare il valore del fattore di potenza. È opportuno avere un  $\cos\phi$  superiore a 0,95 per evitare di pagare le penalità previste.

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

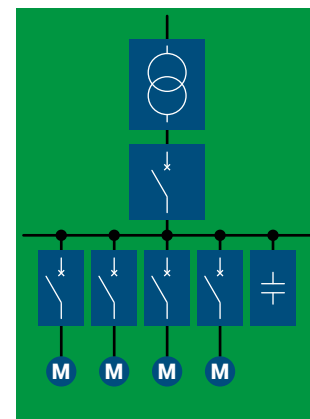
La scelta va effettuata tra **rifasamento distribuito** e **rifasamento centralizzato**.

Nel caso di rifasamento distribuito, le unità rifasanti sono disposte nelle immediate vicinanze di ogni singolo carico che si vuole rifasare.

Nel caso di rifasamento centralizzato, si installa un'unica batteria automatica a monte di tutti i carichi da rifasare e immediatamente a valle del punto di misura del  $\cos\phi$  (ad esempio nella cabina di trasformazione MT/BT o nel Quadro di Distribuzione Principale).



Rifasamento distribuito



Rifasamento centralizzato

Tecnicamente, il rifasamento distribuito è la soluzione preferibile: condensatori e apparecchio utilizzatore seguono le stesse sorti durante l'esercizio giornaliero, per cui la regolazione del fp diventa sistematica e rigidamente legata al carico rifasato. Inoltre, con il rifasamento distribuito lo sgravio di energia reattiva interessa sia l'Ente Distributore sia l'utente. Negli impianti industriali, ad esempio, il risparmio ottenibile con il rifasamento distribuito si manifesta sia sotto forma tariffaria, sia sotto forma di miglior dimensionamento di tutte le linee interne allo stabilimento che collegano la cabina MT/BT con le utenze.

Un altro notevole vantaggio di questo tipo di rifasamento è l'installazione semplice e poco costosa, in quanto rifasatori e carico sono inseriti e disinseriti contemporaneamente e possono usufruire delle stesse protezioni contro i sovraccarichi ed i corto circuiti.

L'andamento giornaliero dei carichi ha un'importanza fondamentale per la scelta del tipo di rifasamento più conveniente. In molti impianti, non tutte le utenze funzionano contemporaneamente e alcune addirittura funzionano solo per poche ore al giorno. È evidente che la soluzione del rifasamento distribuito diventa troppo costosa per l'elevato numero di rifasatori che si dovrebbero prevedere e molti di questi condensatori sarebbero per lungo tempo inutilizzati. Il rifasamento distribuito è conveniente qualora la maggior parte della potenza reattiva richiesta sia concentrata su pochi carichi di grossa potenza che lavorano molte ore al giorno.

Il rifasamento centralizzato conviene invece nel caso di impianti con molti carichi eterogenei che lavorano saltuariamente. In tal caso la potenza della batteria risulta molto inferiore alla potenza complessiva che bisognerebbe prevedere con il rifasamento distribuito.

È opportuno collegare la batteria permanentemente solo se l'assorbimento di energia reattiva durante la giornata è sufficientemente regolare, altrimenti deve essere manovrata al fine di evitare di avere il fp in anticipo. Se l'assorbimento di potenza reattiva è molto variabile durante il funzionamento dell'impianto, è consigliabile prevedere una regolazione automatica frazionando la batteria in più gradini. Si può prevedere la manovra manuale quando la batteria deve essere azionata poche volte al giorno.

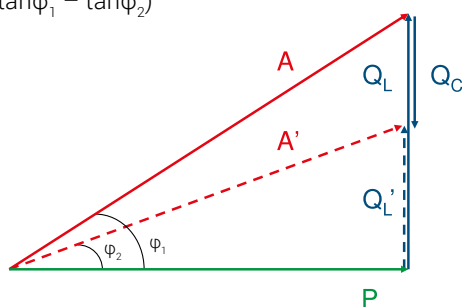
## Rifasare: quanto?

La scelta della batteria di condensatori da installare in un impianto è direttamente dipendente da:

- valore del  $\cos\varphi_2$  che si vuole ottenere;
- valore del  $\cos\varphi_1$  di partenza;
- potenza attiva installata.

La relazione è la seguente:

$$Q_C = P \cdot (\tan\varphi_1 - \tan\varphi_2)$$



La formula può anche essere scritta  $Q_C = k \cdot P$

dove il parametro  $k$  è facilmente calcolabile utilizzando la Tabella 1 (in APPENDICE).

Supponiamo di avere installato un carico che assorbe una potenza attiva pari a 300kW con un fattore di potenza iniziale 0,7 e lo si voglia innalzare a 0,97.

Dalla tabella 1 si ricava:  $k = 0,770$ .

e quindi:

$$Q_C = 0,770 \cdot 300 = 231 \text{ kvar}$$

dove:

$Q_C$  = potenza reattiva capacitiva da installare (kvar);

$P$  = potenza attiva installata (kW);

$Q_L, Q'_L$  = potenza reattiva induttiva prima e dopo l'installazione della batteria di condensatori;

$A, A'$  = potenza apparente prima e dopo il rifasamento.

Un tipico rifasamento a volte poco considerato ma decisamente importante è quello dei trasformatori MT/BT per la distribuzione di energia.

Si tratta essenzialmente di un rifasamento fisso che ha lo scopo di compensare la potenza reattiva assorbita dal trasformatore nel suo funzionamento a vuoto (ciò accade spesso durante le ore notturne). Il calcolo della potenza reattiva necessaria è molto semplice e si basa sulla seguente formula:

$$Q_C = I_0\% \cdot \frac{A_N}{100}$$

dove

$I_0\%$  = corrente a vuoto percentuale del trasformatore

$A_N$  = potenza apparente espressa in kVA del trasformatore

In assenza di questi dati, si può far riferimento alla seguente tabella.

Potenza del trasformatore [kVA]	In olio [kvar]	in resina [kvar]
10	1	1,5
20	2	1,7
50	4	2
75	5	2,5
100	5	2,5
160	7	4
200	7,5	5
250	8	7,5
315	10	7,5
400	12,5	8
500	15	10
630	17,5	12,5
800	20	15
1000	25	17,5
1250	30	20
1600	35	22
2000	40	25
2500	50	35
3150	60	50

Un altro esempio di rifasamento molto importante riguarda il motore asincrono trifase che è rifasato localmente.

La potenza reattiva da installare è riportata nella tabella sottostante:

Potenza del motore		Potenza rifasante necessaria [kvar]				
HP	KW	3000 giri/min	1500 giri/min	1000 giri/min	750 giri/min	500 giri/min
0,4	0,55	–	–	0,5	0,5	–
1	0,73	0,5	0,5	0,6	0,6	–
2	1,47	0,8	0,8	1	1	–
3	2,21	1	1	1,2	1,6	–
5	3,68	1,6	1,6	2	2,5	–
7	5,15	2	2	2,5	3	–
10	7,36	3	3	4	4	5
15	11	4	5	5	6	6
30	22,1	10	10	10	12	15
50	36,8	15	20	20	25	25
100	73,6	25	30	30	30	40
150	110	30	40	40	50	60
200	147	40	50	50	60	70
250	184	50	60	60	70	80

Unica avvertenza nel caso di rifasamento di motori asincroni trifase è quella di mantenere la potenza reattiva della batteria di condensatori al di sotto della potenza reattiva a vuoto del motore per evitare di incorrere nel fenomeno della auto-eccitazione. Nel caso di motori con rotore avvolto la potenza reattiva della batteria di condensatori deve essere aumentata del 5%.

## Rifasare: le ragioni tecniche

La liberalizzazione del mercato dell'energia elettrica ha portato ad un'offerta di molteplici tipologie di contratti di fornitura, e non sempre nelle bollette sono esplicitate le penali per basso fattore di potenza.

Oltre alla riduzione/eliminazione delle penali in bolletta, i vantaggi tecnico-economici dovuti all'installazione di una batteria di condensatori sono i seguenti:

- diminuzione delle perdite in linea e nei trasformatori dovuta alla minor corrente assorbita;
- diminuzione delle cadute di tensione nelle linee;
- ottimizzazione del dimensionamento dell'impianto.

La corrente I che circola nell'impianto è data da:

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot V \cdot \cos\phi}$$

dove

P = potenza attiva assorbita dall'impianto

V = tensione di esercizio

Aumentando il fp, a pari potenza assorbita si ottiene la riduzione del valore della corrente e conseguentemente delle perdite in linea e nei trasformatori. Pertanto si ha un importante risparmio sul materiale utilizzato per il trasporto di energia (miglior dimensionamento dell'impianto). Il miglior dimensionamento dell'impianto si riflette sulle cadute di tensione in linea, fenomeno che si può facilmente interpretare considerando la seguente formula:

$$\Delta V = R \cdot \frac{P}{V} + X \cdot \frac{Q}{V}$$

dove

P = Potenza attiva trasportata dalla linea (kW)

Q = Potenza reattiva trasportata dalla linea (kvar)

R è la resistenza del cavo e X la sua reattanza (R << X).

L'installazione di una batteria di condensatori diminuisce il valore di Q consentendo così di avere una caduta di tensione inferiore. Se per un errato calcolo del valore della batteria di condensatori installata nell'impianto il termine  $\Delta V$  dovesse diventare negativo, anziché una riduzione di caduta di tensione si avrebbe un aumento di tensione a fine linea (Effetto Ferranti) con conseguenze dannose per i carichi installati.

Ecco un esempio tabellare dei concetti esposti precedentemente:

cosφ	Potenza dissipata <sup>1</sup> [kW]	Potenza attiva erogata <sup>2</sup> [kW]
0,5	3,2	50
0,6	2,3	60
0,7	1,6	70
0,8	1,3	80
0,9	1	90
1	0	100

1. In funzione del fp, da un cavo in rame 3 x 25mm<sup>2</sup> lungo 100m che trasporta 40kW a 400Vac  
2. Da un trasformatore da 100kVA, in funzione del fp

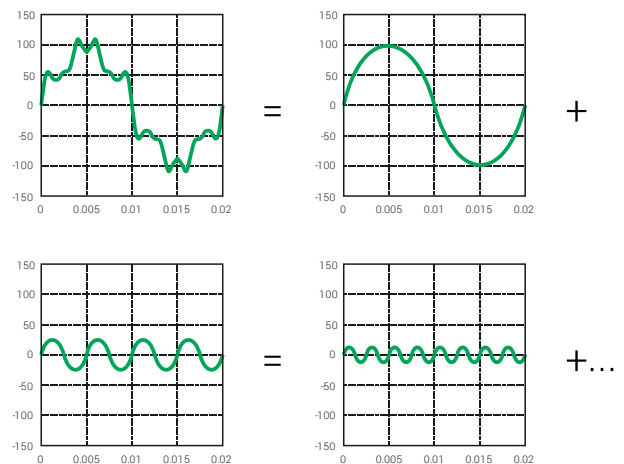
Come si vede aumentando il fattore di potenza si hanno meno perdite in linea e una maggiore potenza attiva erogata dal trasformatore. Questo permette di ottimizzare il dimensionamento dell'impianto con notevole risparmio di materiali.

## Rifasare: le armoniche nelle reti elettriche

Le distorsioni della corrente (e quindi le armoniche, vedasi nel seguito), sono generate da carichi non lineari (inverter, saldatrici ad arco, trasformatori saturati, raddrizzatori etc.). La loro presenza in rete comporta molteplici problemi sugli elementi di un impianto elettrico:

- Nelle macchine rotanti si ha l'insorgere di coppie parassite (con conseguenti vibrazioni) che ne minano la durata meccanica. L'aumento delle perdite provoca inoltre riscaldamento indesiderati con conseguente danneggiamento degli isolamenti;
- Nei trasformatori causano l'aumento delle perdite nel rame e nel ferro con possibile danneggiamento degli avvolgimenti. L'eventuale presenza di componenti continue di tensione o corrente può comportare la saturazione del nucleo con conseguente aumento della corrente magnetizzante;
- I condensatori ne risentono dal punto di vista del riscaldamento e dell'aumento della tensione con una riduzione della vita media.

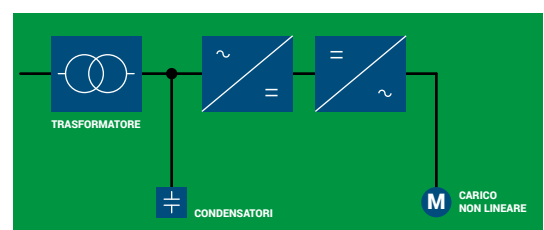
La forma d'onda della corrente generata da un carico non lineare essendo periodica può essere rappresentata come la somma di più onde sinusoidali (una a 50Hz detta fondamentale e altre con frequenza multipla della fondamentale dette **armoniche**).

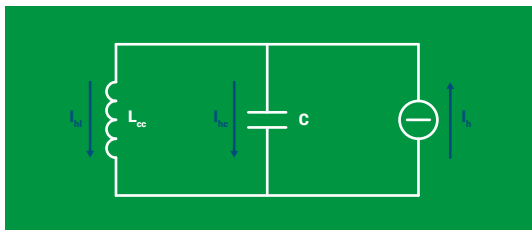


$$I = I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n$$

È in generale sconsigliabile rifasare senza alcun accorgimento una linea con contenuto armonico elevato. Questo perché, anche se si possono costruire condensatori in grado di sopportare forti sovraccarichi, il rifasamento eseguito con soli condensatori si traduce in un incremento del contenuto armonico, con gli effetti negativi appena visti. Si parla di fenomeno di risonanza ogni qual volta una reattanza induttiva è uguale a quella capacitiva:

$$2\pi f L = \frac{1}{2\pi f C}$$





Il generatore di corrente rappresenta il motore che genera le componenti armoniche  $I_h$  indipendenti dall'impedenza del circuito mentre  $L_{cc}$  è ricavabile dalla potenza di corto circuito a monte del condensatore (normalmente coincide con l'induttanza di corto-circuito del trasformatore).

La risonanza si calcola nel seguente modo:

$$N = \sqrt{\frac{S_{cc}}{Q}} \approx \sqrt{\frac{A \cdot 100}{Q \cdot V_{cc}\%}}$$

dove

- $S_{cc}$  = potenza di corto circuito della rete (MVA)
- $Q$  = potenza della batteria di rifasamento (kvar)
- $A$  = potenza del trasformatore (kVA)
- $V_{cc}\%$  = tensione di corto circuito del trasformatore
- $N$  = ordine di armonicità (multiplo della frequenza di rete)

In condizioni di risonanza parallelo la corrente e la tensione relative alla maglia  $L_{cc} - C$  sono fortemente amplificate così come le armoniche vicine.

Un esempio chiarirà i concetti appena esposti:

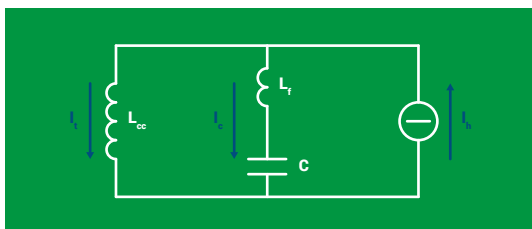
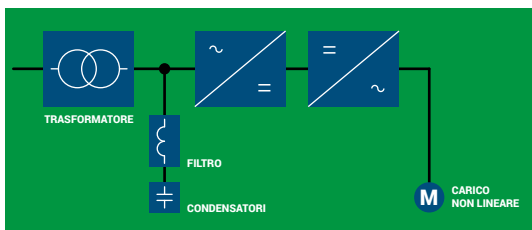
- $A = 630\text{kVA}$  (potenza apparente del trasformatore MT/BT)
- $V_{cc}\% = 6$  (tensione di corto circuito % del trasformatore MT/BT)
- $Q = 300\text{kvar}$  (potenza reattiva installata)

$$N = \sqrt{\frac{A \cdot 100}{Q \cdot V_{cc}\%}} = \sqrt{\frac{630 \cdot 100}{300 \cdot 6}} \approx 6$$

Quindi il sistema trasformatore-batteria di condensatori ha un ordine di armonicità  $N = 6$  ovvero la frequenza di risonanza parallelo è pari a  $6 \times 50\text{Hz} = 300\text{Hz}$ .

C'è pericolo di risonanza sulla 5a e sulla 7a armonica.

La soluzione più conveniente per evitare questo tipo di problematiche è il filtro di sbarramento (Detuned Filter), ottenibile ponendo in serie ai condensatori delle reattanze che, spostando la frequenza di risonanza parallelo dell'impianto al di sotto dell'armonica più bassa esistente, sono in grado di proteggere i condensatori e nel frattempo evitano risonanze pericolose.



Con questo tipo di soluzione la frequenza di risonanza parallelo si modifica da

$$f_{rp} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L_{cc} \times C}}$$

a

$$f_{rp} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{(L_{cc} + L_f) \times C}}$$

Normalmente la frequenza di risonanza tra condensatore e reattanza serie viene abbassata al di sotto dei 250Hz ed è generalmente compresa tra 135Hz e 210Hz. I valori più bassi corrispondono a carichi armonici più elevati. L'installazione di una reattanza in serie alla batteria di condensatori dà origine anche ad una frequenza di risonanza serie:

$$f_{rs} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L_f \times C}}$$

Se esiste un'armonica  $I_h$  con frequenza uguale a quella della risonanza serie, questa verrà totalmente assorbita dal complesso condensatori - reattori senza interessare la rete. Su questo semplice principio si basa la realizzazione del filtro di assorbimento (Tuned Filter). La sua applicazione viene richiesta quando si vuole la riduzione della distorsione totale in corrente (THD) presente nell'impianto:

$$THD = \frac{\sqrt{I_3^2 + I_5^2 + I_7^2 + \dots + I_n^2}}{I_1}$$

dove

- $I_1$  = componente alla frequenza fondamentale (50Hz) della corrente armonica di linea
- $I_3 - I_5 - \dots$  = componenti armoniche alle frequenze multiple della fondamentale (150Hz, 250Hz, 350Hz, ...)

Il dimensionamento di queste apparecchiature è legato ai seguenti parametri circuitali:

- impedenza della rete (l'effetto filtrante è tanto minore quanto maggiore è la potenza di corto circuito della rete: in alcuni casi può essere necessario aggiungere in serie alla rete una reattanza in modo da aumentare l'effetto filtrante);
- presenza di eventuali ulteriori utenze distorcenti allacciate ad altri nodi della rete;
- tipologia dei condensatori utilizzati.

Riguardo a quest'ultimo punto si devono fare alcune considerazioni.

È noto che i condensatori tendono a diminuire di capacità nel tempo: variando la capacità varia inevitabilmente la frequenza di risonanza serie

$$f_{rs} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L_f \times C}}$$

e questo inconveniente può essere molto pericoloso perché il sistema si potrebbe portare in condizioni di risonanza parallelo. In questo caso non solo il filtro non assorbe più le armoniche ma addirittura le amplifica.

Per avere garanzia di capacità costante nel tempo è necessario utilizzare un'altra tipologia di condensatori realizzati in carta bimetallizzata e polipropilene totalmente impregnato.

Oltre al filtro di assorbimento realizzato con condensatori e induttanze (filtro passivo) è possibile, per eliminare le armoniche in rete, utilizzare anche un'altra tipologia costruttiva di filtro di assorbimento: il Filtro Attivo. Il principio di funzionamento si basa sulla iniezione in linea delle medesime armoniche di corrente prodotte dai carichi non lineari, ma cambiate di segno.

## Rifasamento in presenza di tensioni deformate

In molti impianti elettrici industriali o del terziario la presenza di utenze non lineari (inverter, saldatrici, lampade non a filamento, computer, azionamenti, etc) determina una distorsione della corrente, che viene sintetizzata mediante il parametro numerico THDI%: se la corrente è sinusoidale il suo THDI% è nullo, tanto più la corrente è deformata tanto più è elevato il suo THDI%.

In impianti elettrici con correnti molto deformate, le apparecchiature di rifasamento vengono realizzate in versione "filtro di sbarramento" (o "di blocco" o "sbarrato" o "detuned"), ovvero con a bordo induttanze che impediscono alle armoniche di corrente di raggiungere e danneggiare i condensatori.

Solitamente la tensione di alimentazione rimane pressoché sinusoidale anche se nell'impianto fluisce una corrente molto deformata; se però l'impedenza del trafo MT/BT di utente è elevata, anche la tensione può essere affetta da deformazione: quest'impedenza, percorsa da una corrente distorta, creerà una caduta di tensione altrettanto distorta, causando sulle utenze BT una tensione di alimentazione non sinusoidale (ovvero con un certo  $THDV_r$  %).

È raro che il  $THDV_r$  % raggiunga l' 8% (valore limite della IEC 50160), ciò accade ad esempio quando il trasformatore MT/BT è caratterizzato da un'elevata impedenza serie e/o risulta sovraccaricato (saturazione).

In un impianto con tensione deformata ci saranno problemi di vari tipi, a seconda delle utenze (malfunzionamento o rottura di parti elettroniche quali relè, plc, controller, computer; produzione oltre le tolleranze accettabili, etc).

Per quanto riguarda il rifasamento, un  $THDV_r$  % elevato crea problemi alle reattanze di blocco utilizzate nei rifasatori "detuned": queste possono saturare e surriscaldarsi per sovraccarico fino a danneggiarsi, determinando il fuori servizio di tutto il rifasatore e/o problematiche ai condensatori.

Questo si tradurrà in un danno economico (pagamento delle penali per basso  $\cos\phi$ ) e tecnico, poiché l'impianto si troverà percorso da una corrente più elevata, con conseguente ulteriore sovraccarico dei conduttori (cavi, sbarre) e del trasformatore.

Per questo problema, ICAR ha sviluppato una soluzione dedicata, ovvero le famiglie dei rifasatori MULTImatic FD25V (per rete a 400V) e FD70V (per rete a 690V). Sono realizzate con gli indistruttibili condensatori in carta bimetallizzata e con strumentazione elettronica ad alta prestazione per il controllo dei parametri elettrici; le reattanze ad alta linearità permettono di sopportare fino a  $THDV_r$  dell'8% continuativo.

## Rifasamento in presenza di impianto fotovoltaico in scambio sul posto

Se ad un impianto elettrico di un'utenza industriale viene aggiunto un impianto fotovoltaico, la potenza attiva assorbita dalla rete si riduce a causa della potenza fornita dal fotovoltaico e consumata dall'impianto (autoconsumo). Cambia dunque il rapporto tra energia reattiva ed energia attiva prelevate dalla rete e, di conseguenza, il fattore di potenza risulta inferiore a quello dello stesso impianto senza fotovoltaico.

Bisogna quindi porre particolare attenzione al rifasamento, per non incappare nelle penali per basso  $\cos\phi$  che potrebbero erodere pesantemente i benefici economici dell'impianto fotovoltaico.

L'impianto di rifasamento dovrà essere rivisto sia per potenza installata che per tipologia costruttiva. Infatti, aumentando la potenza del rifasatore, si modificheranno le condizioni di risonanza con il trasformatore MT/BT che alimenta l'impianto.

Quando l'impianto fotovoltaico ha una potenza maggiore di quella delle utenze, o se comunque è possibile che venga immessa potenza in rete, il rifasatore dovrà inoltre essere in grado di funzionare su quattro quadranti ovvero i due quadranti "standard", relativi al funzionamento dell'impianto come utenza che assorbe dalla rete sia potenza attiva che potenza reattiva induttiva (quadranti di funzionamento normale) e i due quadranti relativi al funzionamento dell'impianto come generatore che fornisce alla rete potenza attiva ma assorbe potenza reattiva induttiva (quadranti di generazione).

Tutti i regolatori elettronici di  $\cos\phi$  della gamma ICAR sono in grado di funzionare su quattro quadranti, gestendo due  $\cos\phi$  target differenti per ottimizzare il rendimento economico dell'impianto.

Per gestire i quadranti di cogenerazione basta modificare le impostazioni di alcuni parametri. È consigliabile inserire un valore pari ad 1, per ottimizzare la resa dell'impianto. Fare riferimento ai manuali dei regolatori per maggiori dettagli. Per ottenere il massimo beneficio nel tempo dal rifasatore, consigliamo l'utilizzo di rifasatori con gli indistruttibili condensatori in carta bimetallizzata, gli unici che garantiscono una vita utile confrontabile con quella dell'impianto fotovoltaico.