

Titolo: Scelta dell'Apparecchiatura di Rifasamento in presenza di Armoniche

Livello: BASE

Edizione: 03/2019 - Rev.0

Autore: Ufficio Tecnico di COMAR Condensatori SPA

1 Riassunto

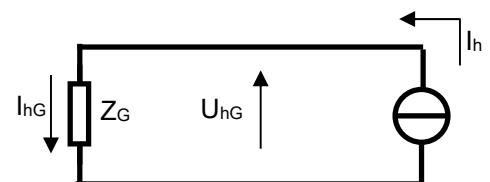
Di seguito vengono descritti i criteri per scegliere una apparecchiatura di rifasamento dal catalogo Comar {1} in funzione delle informazioni raccolte sulla rete elettrica, su cui è necessario ridurre la potenza reattiva assorbita dalla rete elettrica, relativamente alle armoniche presenti.

Se si verifica l'esistenza del rischio di risonanza con una delle armoniche presenti in rete, è necessario adottare un banco di condensatori con induttanza serie. La frequenza di risonanza preferibile è quella che riduce il contenuto armonico sui condensatori, per garantirne una lunga vita. Si evidenzia che una frequenza di sintonia bassa (ad esempio di 138 Hz) riduce maggiormente le armoniche che fluiscono sul banco di condensatori, rispetto ad una frequenza più alta (ad esempio di 189 Hz).

Infine viene posto l'accento sul metodo di misura del valore THDu che identifica il livello armonico in tensione presente sulla rete elettrica. Essendo l'inerzia termica delle induttanze dell'ordine dei 30 .. 60 min, le misure del THDu possono essere mediate su un tempo di 30 min.

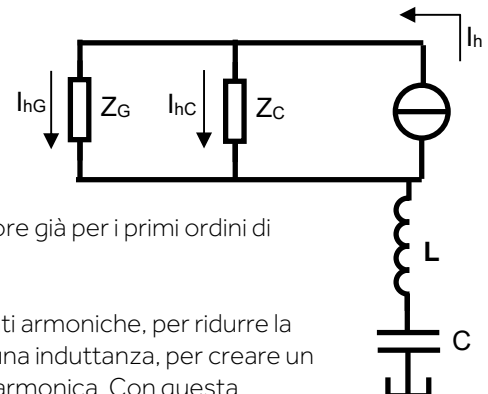
2 Cenni sulle armoniche

In una rete elettrica senza condensatori le armoniche prodotte dai carichi distortanti (raddrizzatori, macchine elettriche sovraccaricate, ecc.) fluiscono prevalentemente sull'elemento della rete avente l'impedenza equivalente più bassa, ovvero prevalentemente sul trasformatore.



Se consideriamo il circuito equivalente di una rete con carichi distortanti, come quello indicato in figura, dove Z_G è l'impedenza equivalente della rete senza i carichi distortanti, le correnti armoniche prodotte ($I_h \equiv I_{hG}$) generano delle tensioni armoniche U_{hG} , facilmente misurabili in ogni punto della rete.

In una rete elettrica dove sono presenti anche dei condensatori, l'impedenza più bassa diventa quella del condensatore, quindi le correnti armoniche tendono a fluire anche sui condensatori.



L'impedenza del condensatore diventa sempre più bassa, più l'ordine dell'armonica aumenta, in pratica diventa inferiore a quella del trasformatore già per i primi ordini di armoniche più comuni prodotti dai carichi distortanti.

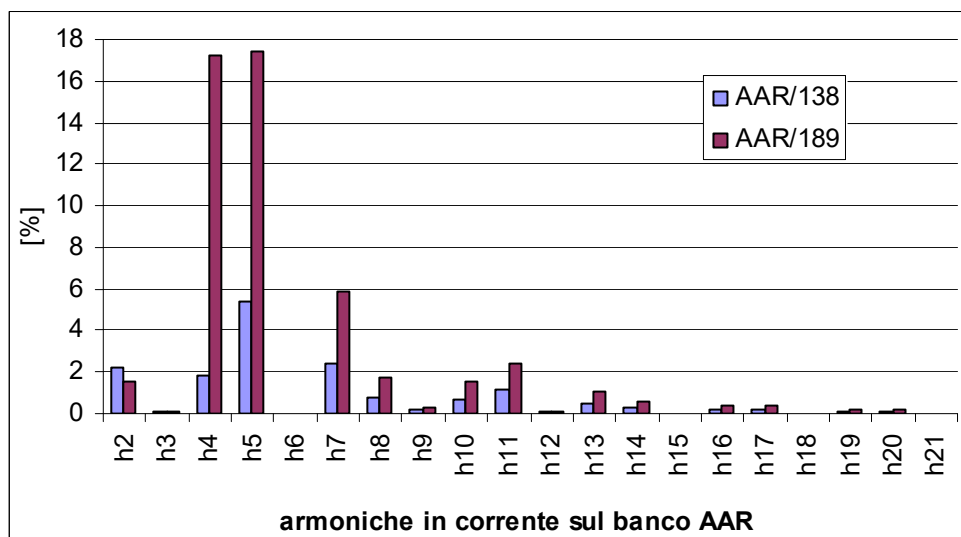
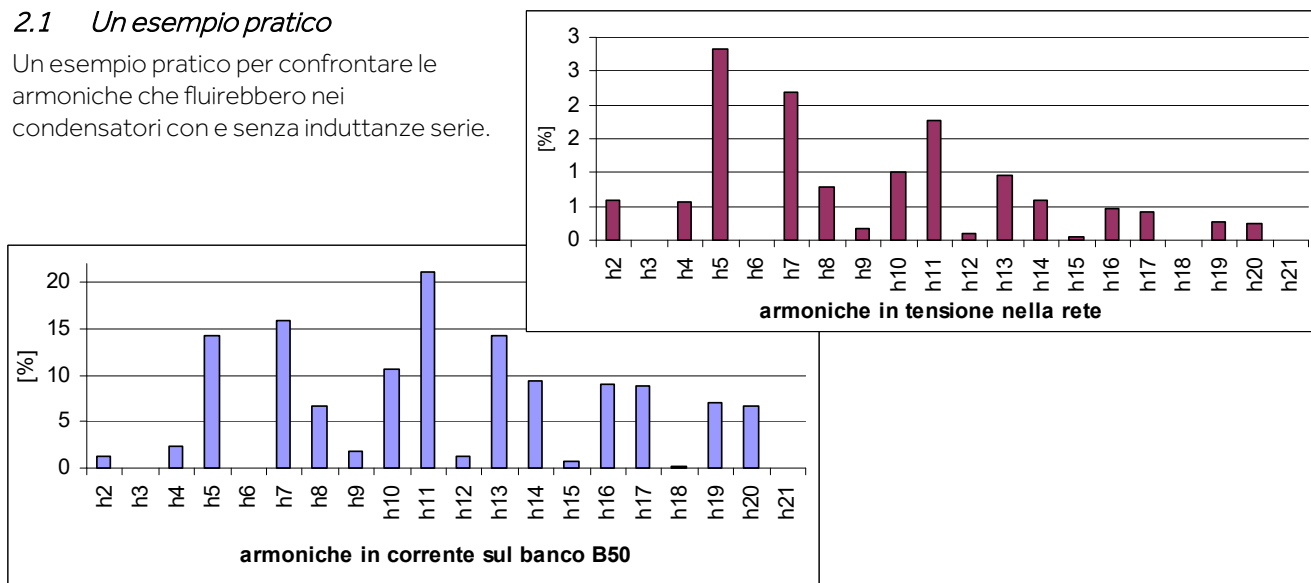
La vita dei condensatori è fortemente influenzata dalla presenza di correnti armoniche, per ridurre la quantità di armoniche che fluiscono nei condensatori si inserisce in serie una induttanza, per creare un carico LC che presenti una elevata impedenza al crescere dell'ordine dell'armonica. Con questa soluzione si abbatta notevolmente il carico delle correnti armoniche sui condensatori.

Per le armoniche superiori, o uguali, alla 5a un banco di condensatori sintonizzato sulla frequenza 138 Hz ha una impedenza maggiore di un banco di condensatori sintonizzato sulla frequenza 189 Hz. Quindi fluiscono meno armoniche sui condensatori se la frequenza di sintonia è 138 Hz, salvaguardandone maggiormente la vita.

Un altro fenomeno da considerare è la riduzione dell'impedenza del trasformatore, all'aumentare della sua potenza del trasformatore, quindi tanto maggiore sarà la potenza del trasformatore, tanto minore saranno le armoniche che fluiranno sul banco di condensatori.

2.1 Un esempio pratico

Un esempio pratico per confrontare le armoniche che fluirebbero nei condensatori con e senza induttanze serie.



Si può notare che le armoniche che fluiscono sul condensatore sono complessivamente inferiori:

- nei casi di banchi con induttanze in serie (AAR/138 e AAR/189⁽¹⁾) se paragonate alle armoniche che fluirebbero in un banco B50 senza induttanze serie;
- nei banchi con induttanze serie sintonizzate su 138 Hz, se paragonate alle armoniche che fluirebbero in un banco con induttanze sintonizzate su 189 Hz.

Note:

(¹) la serie AAR/189 è anche denominata AAR/100

3 Impedenze dei banchi di condensatori a confronto

3.1 Confronto tra l'impedenza calcolata alla 5a armonica e quella di un trasformatore

Considerando invariato il valore in tensione delle armoniche, analizzando la 5a armonica, risulta che l'impedenza del banco a confronto è la seguente.

| Banco di condensatori | Impedenza $ Z(250\text{Hz}) $ [Ω] |
|------------------------|--|
| B50 – 25 kvar | 1.4 |
| B50 – 50 kvar | 0.7 |
| B50 – 75 kvar | 0.5 |
| AAR ft=189Hz – 25 kvar | 1.0 |
| AAR ft=189Hz – 50 kvar | 0.5 |

| Banco di condensatori | Impedenza $ Z(250\text{Hz}) $ [Ω] |
|-------------------------|--|
| AAR ft=189Hz – 75 kvar | 0.3 |
| AAR ft=138Hz – 25 kvar | 3.4 |
| AAR ft=138Hz – 50 kvar | 1.7 |
| AAR ft=138Hz – 75 kvar | 1.1 |
| Trasformatore da 400kVA | 0.08 |

3.2 Confronto tra l'impedenza calcolata alla 7a armonica e quella di un trasformatore

Considerando invariato il valore in tensione delle armoniche, analizzando la 7a armonica, risulta che l'impedenza del banco a confronto è la seguente.

| Banco di condensatori | Impedenza $ Z(350\text{Hz}) $ [Ω] |
|------------------------|--|
| B50 – 25 kvar | 1.0 |
| B50 – 50 kvar | 0.5 |
| B50 – 75 kvar | 0.3 |
| AAR ft=189Hz – 25 kvar | 2.4 |
| AAR ft=189Hz – 50 kvar | 1.2 |

| Banco di condensatori | Impedenza $ Z(350\text{Hz}) $ [Ω] |
|-------------------------|--|
| AAR ft=189Hz – 75 kvar | 0.8 |
| AAR ft=138Hz – 25 kvar | 5.7 |
| AAR ft=138Hz – 50 kvar | 2.9 |
| AAR ft=138Hz – 75 kvar | 1.9 |
| Trasformatore da 400kVA | 0.11 |

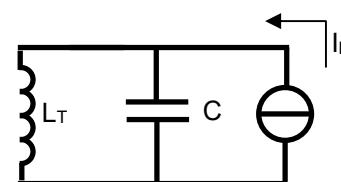
4 Rischio di malfunzionamento delle apparecchiature collegate alla rete elettrica, aventi stadi con una elettronica di potenza rivolta verso la rete elettrica

La presenza di banchi condensatori senza induttanze serie sulla rete elettrica, può comportare un radicale cambiamento dell'impedenza della rete elettrica alle alte frequenze.

Se consideriamo l'impedenza alla 11a armonica, l'impedenza di una rete con un trasformatore da 100 kVA in cui viene inserito un banco da 75 kvar, viene ridotta a meno di 1/3. Ad esempio questo può provocare un sovraccarico dello stadio di potenza di un inverter per il fotovoltaico presente sulla rete.

5 Analisi del rischio di risonanza con il trasformatore a monte

La vita dei condensatori è negativamente influenzata dalla quantità di armoniche che vi circolano. Nel caso di risonanza parallelo tra il trasformatore a monte (L_T) ed il banco di condensatori (C), la quantità di armoniche che circola nei condensatori viene amplificata, riducendo drasticamente la vita dei condensatori.



5.1 Per una apparecchiatura di rifasamento automatico

Qualora ci sia la presenza di armoniche, eseguire l'analisi del rischio di risonanza, come indicato nel seguito. Se il rischio di risonanza esiste, deve essere installata una apparecchiatura con induttanze serie (ovvero filtro non accordato o desintonizzato).

Per analizzare il rischio di risonanza è stata utilizzata la formula, presente anche nel catalogo Comar.

$$h_r = \sqrt{\frac{X_c}{X_{sc}}} = \sqrt{\frac{P_{sc}}{Q_c}} \approx \sqrt{\frac{1}{Q_c} \cdot \frac{S_{tr}}{Z_{tr}\% \cdot 100}}$$

h_r ordine di risonanza

P_{sc} Potenza di corto circuito nel punto di inserzione del banco di condensatori

Q_c Potenza reattiva del banco di condensatori

X_c reattanza del banco di condensatori @ f_1

X_{sc} reattanza al corto circuito del trasformatore

S_{tr} Potenza apparente del trasformatore

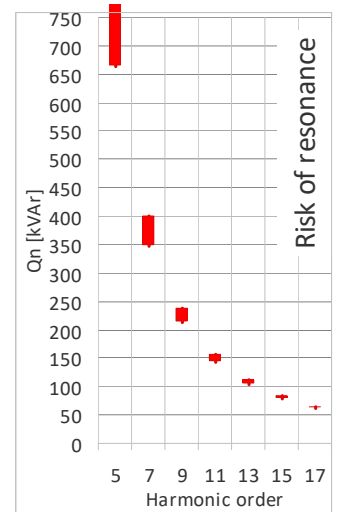
$Z_{tr}\%$ impedenza del trasformatore % $\equiv U_{cc}\%$

Per individuare quando una installazione è a rischio di risonanza si deve verificare se l'ordine di risonanza h_r risultante sia vicino ad una armonica.

Per facilitare questa verifica, è stato sviluppato un foglio di calcolo che genera automaticamente un grafico come quello a lato.

Il rischio di risonanza è presente quando la linea nera orizzontale interseca la barra rossa.

Le linee orizzontali corrispondono ai valori di potenza reattiva che il quadro di rifasamento può produrre (esempio con gradini da 50 kvar nel grafico a lato).



5.1.1 Quando eseguire l'analisi del rischio

Eseguire l'analisi descritta sopra almeno se una delle seguenti condizioni è vera

- se il quadro di rifasamento viene installato nella cabina dove è presente il trasformatore MT/BT;
- se a monte esiste almeno un trasformatore dedicato per l'utenza da rifasare;
- se la potenza attiva disponibile dell'utenza da rifasare è maggiore di 200 kW.

5.2 Per N apparecchiature di rifasamento fisso

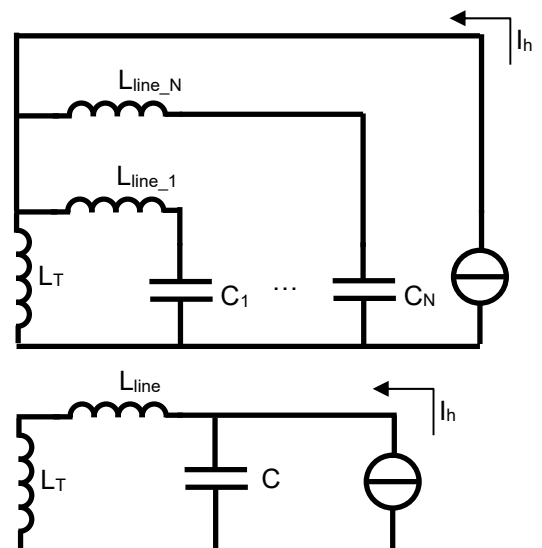
Qualora sulla rete elettrica esista un elevato numero di apparecchiature di rifasamento, il rischio di risonanza potrebbe esistere, considerando la somma di tutte le potenze di rifasamento.

Se il rischio di risonanza esiste, devono essere installate apparecchiature fisse decentralizzate con induttanze serie (filtro non accordato o desintonizzato), oppure deve essere valutata l'ipotesi di adottare una apparecchiatura centralizzata di rifasamento con induttanze serie.

Per applicare il criterio descritto al capitolo precedente 5, si può eseguire la semplificazione mostrata a lato.

Dove

- C – capacità equivalente a tutte le singole apparecchiature di rifasamento $C_1 \dots C_N$
- L_T – induttanza equivalente del trasformatore
- L_{line} – induttanza equivalente della linea di collegamento al trasformatore



Nella pratica si possono considerare nei calcoli maggiorazioni dell'impedenza equivalente del trasformatore tali da inglobare il contributo delle linee di collegamento tra apparecchiature di rifasamento ed il trasformatore a monte. In pratica si ricava che l'inserimento del cavo in serie all'apparecchiatura distribuita fa abbassare i valori di potenza reattiva a cui si potrebbe verificare la risonanza.

5.3 Cosa serve sapere alla Comar sull'impianto elettrico

Per eseguire l'analisi del rischio di risonanza sono necessarie le informazioni descritte al par. 5.1, riepilogate di seguito:

Ipotesi A – singola apparecchiatura di rifasamento con singolo trasformatore a monte

Potenza reattiva del banco di condensatori Q_C

Potenza apparente del trasformatore S_{tr}

Tensione di corto circuito percentuale $U_{cc}\%$ (in alternativa l'impedenza $Z_{tr}\%$ del trasformatore percentuale)

Ipotesi B – quadri multipli di rifasamento

Per ogni apparecchiatura di rifasamento richiedere le informazioni descritte nell'ipotesi A, con la distanza tra le apparecchiature ed il trasformatore a monte e la tipologia di cavo di collegamento (solo se maggiore di 20 m).

Ipotesi C – trasformatori multipli

Per ogni trasformatore devono essere richieste le informazioni descritte nell'ipotesi A, con la distanza tra i trasformatori e la tipologia di cavo di collegamento tra i diversi trasformatori (solo se maggiore di 20 m)

In ogni caso è necessario conoscere lo spettro armonico della rete elettrica.

6 Scelta in funzione del livello delle armoniche

Consideriamo i seguenti parametri

THD_{iCat} – THD in corrente sul banco di condensatori dichiarata sul catalogo

G_n – potenza dei carichi distorcanti [kW]

S_n – potenza apparente del trasformatore [kVA]

THD_{iC} – THD in corrente sul banco di condensatori considerata in questa documentazione tecnica

THD_{iG} – THD in corrente sul trasformatore dichiarata sul catalogo

THD_u – THD in tensione della rete corrispondente a THD_{iC} , oppure valore minimo ricavato dalle schede di progetto

f_t – frequenza di risonanza

Di seguito viene riportata una tabella di selezione della serie dell'apparecchiatura di rifasamento in funzione di alcuni di questi parametri più facilmente reperibili dai clienti:

G_h/S_n – questo rapporto è stimabile senza eseguire misure

THD_u – questo parametro è misurabile facilmente o stimabile sull'impianto in fase di progetto

| G_h/S_n | ≤ 0.1 | ≤ 0.15 | ≤ 0.3 | ≤ 0.4 | > 0.4 | > 0.4 | > 0.4 | > 0.4 |
|------------------|------------|-------------|------------|------------|------------|-------------------------|------------|------------------------|
| THD_u [%] | ≤ 5 | ≤ 9 | ≤ 10 | ≤ 11 | ≤ 3 | $\leq 7, \leq 11^{(3)}$ | ≤ 21 | $\leq 4, \leq 8^{(3)}$ |
| THD_{iCat} [%] | ≤ 50 | ≤ 70 | ≤ 80 | ≤ 90 | - | - | - | - |
| THD_{iC} [%] | ≤ 50 | ≤ 70 | ≤ 85 | ≤ 85 | ≤ 67 | ≤ 67 | ≤ 67 | ≤ 67 |
| THD_{iG} [%] | ≤ 15 | ≤ 25 | ≤ 35 | ≤ 40 | ≤ 100 | ≤ 100 | ≤ 100 | ≤ 100 |
| f_t [Hz] | - | - | - | - | 189 | 189 | 189 | 135 |
| Modello {1} | B15 | B35 | B50 | DMP | AAR/100 | AAR/6xx | AAR/D20 | AAR/138 |

Note:

⁽³⁾ non usando il cassetto da 75 kvar, ma solo i cassettei da 25 e 50 kvar

6.1 Scelta della frequenza di sintonia

Facendo riferimento alla descrizione presente al capitolo 2, si può scegliere la frequenza di sintonia f_r tenendo conto di quanto segue.

Tutte le correnti armoniche aventi ordine armonico ≥ 5 vengono maggiormente attenuate da un banco di condensatori con frequenza di sintonia 138 Hz, rispetto ad uno con 189 Hz o superiore, quindi

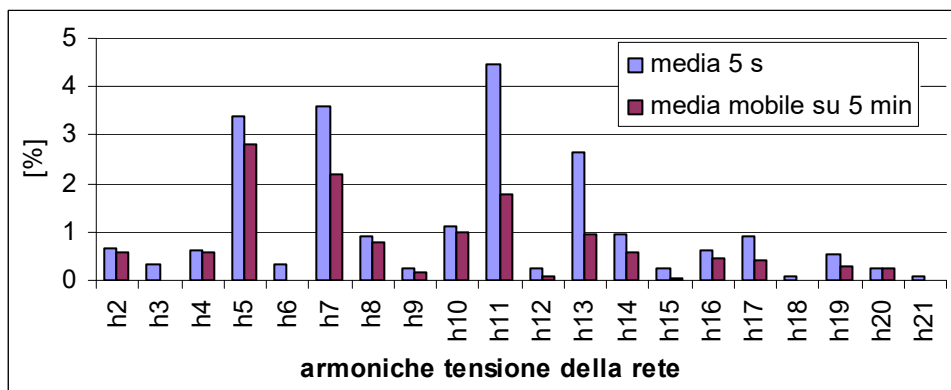
- se la potenza del trasformatore è molto bassa è preferibile una frequenza di sintonia 138 Hz
- se la potenza del trasformatore è medio / alta si può optare per banchi LC più economici, ad esempio sintonizzati su 189 Hz (in bassa tensione), oppure 215 Hz (in media tensione)

Infine, nella scelta della frequenza di sintonia considerare anche che la 3a armonica, se presente su tutte e 3 le fasi in modo bilanciato, non entrerà mai nel banco di condensatori, se privo di neutro. Sul banco di condensatori potranno solo fluire correnti di 3a armonica non bilanciate: ovvero quelle tra fase e fase.

6.2 Analisi delle misure per ricavare il THDu massimo di una rete

Considerate le costanti di tempo termiche delle induttanze (dell'ordine dei 30-60 min) i valori delle armoniche misurate devono essere analizzate con un periodo di integrazione (ovvero il periodo della media di misura) comparabile.

Un esempio che mostra i valori delle misure a confronto, con media a 5 s, oppure a 5 min.



In conclusione, considerando i valori di picco delle armoniche si rischia di sovra dimensionare il quadro.

Se invece consideriamo apparecchiature con induttanze aventi una linearità ($L > 0.9 L_n$)

$$\frac{I_{sat}}{I_{h1}} > 1.5, \text{ dove } I_{sat} \text{ è la corrente di saturazione, } I_{h1} \text{ è la corrente della fondamentale}$$

si può considerare di utilizzare valori mediati in un periodo di almeno 30 min per avere un buon rapporto costo prestazioni.