

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

**Livello:** ESPERTO

**Edizione:** 03/2019 - Rev.0

**Autore:** Ufficio Tecnico di COMAR Condensatori SPA

## 1 Riassunto

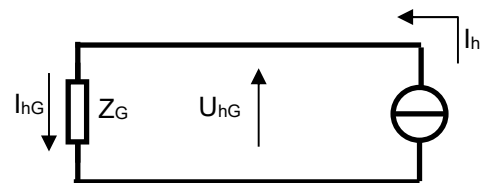
Di seguito vengono descritti i criteri per scegliere una apparecchiatura di rifasamento dal catalogo Comar {1} in funzione delle informazioni raccolte sulla rete elettrica, su cui è necessario ridurre la potenza reattiva assorbita dalla rete elettrica, relativamente alle armoniche presenti.

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.

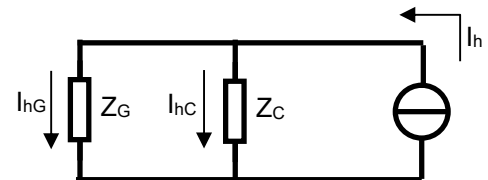
## 2 Cenni sulle armoniche

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.



Se definiamo

- $h$  – ordine dell'armonica
- $I_{hC}$  – corrente armoniche che fluisce sui condensatori
- $Z_C$  – impedenza dei condensatori
- $X_C$  – reattanza dei condensatori
- $X_L$  – reattanza dell'induttanza
- $f$  – frequenza
- $C$  – capacità del condensatore

Se consideriamo che vale

$$X_L(h) = h \cdot X_L; \quad X_C(h) = -\frac{X_C}{h}$$

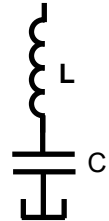
$$I_h = \frac{V_h}{Z(h)}$$

valgono le seguenti formule per la corrente armonica che fluisce sui condensatori  $I_{hC} = I_h \cdot \frac{Z_C}{Z_G + Z_C}$  e per

l'impedenza dei condensatori  $Z_C \approx \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C}$ . Se ne ricava che 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 distortenti.

La vita dei condensatori è fortemente influenzata dalla presenza di correnti armoniche, per ridurre questo effetto si tende ad inserire in serie ai condensatori 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.



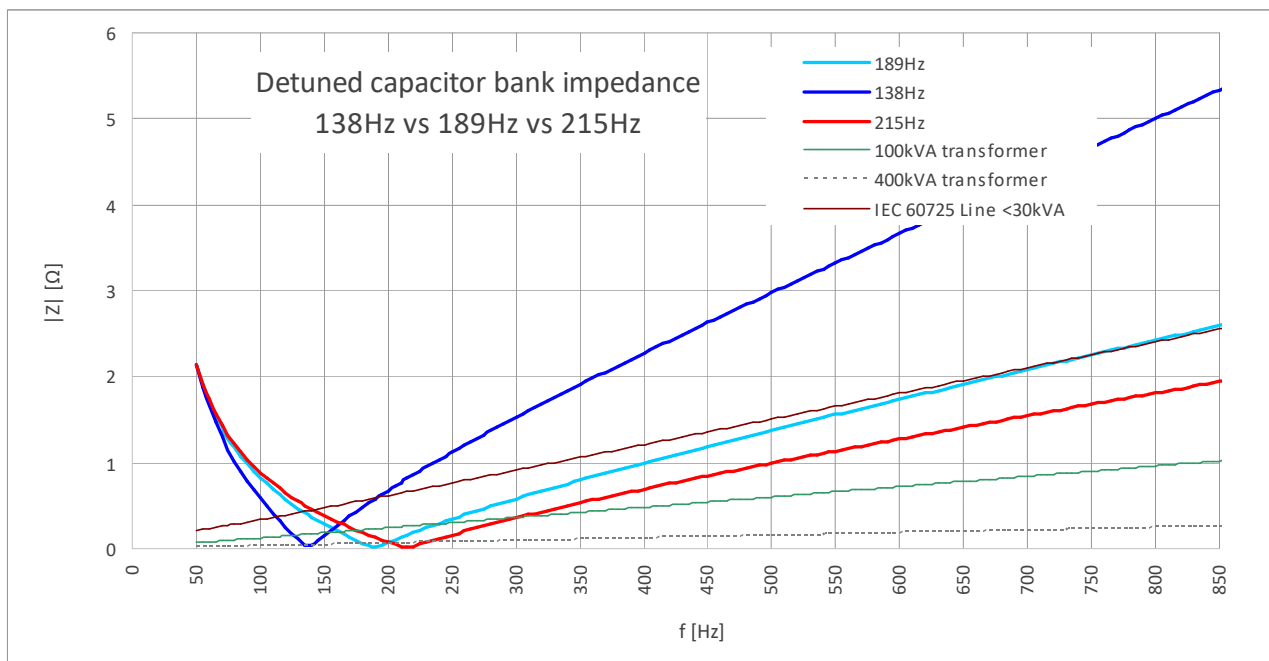
Se per semplicità di calcolo, consideriamo l'impedenza della rete approssimabile all'impedenza del trasformatore a monte ( $Z_G \approx Z_T$ ), questa può essere ricavabile dai dati costruttivi del trasformatore ed essere messa a confronto con l'impedenza di un banco di condensatori con induttanza in serie.

Le rette rappresentano l'impedenza di diversi trasformatori:

- da 400 kVA
- da 100 kVA
- il caso limite secondo IEC di una rete con potenza < 30kVA

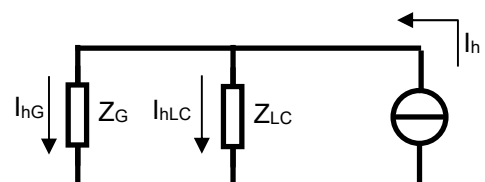
Le curve a V rappresentano l'impedenza di un banco di rifasamento LC, con diverse frequenze di sintonia:

- 138 Hz
- 189 Hz
- 215 Hz



Da questo grafico e dalla equivalente formula

$$I_{hLC} = I_h \cdot \frac{Z_{LC}}{Z_G + Z_{LC}} \approx I_h \cdot \frac{Z_{LC}}{Z_T + Z_{LC}}$$



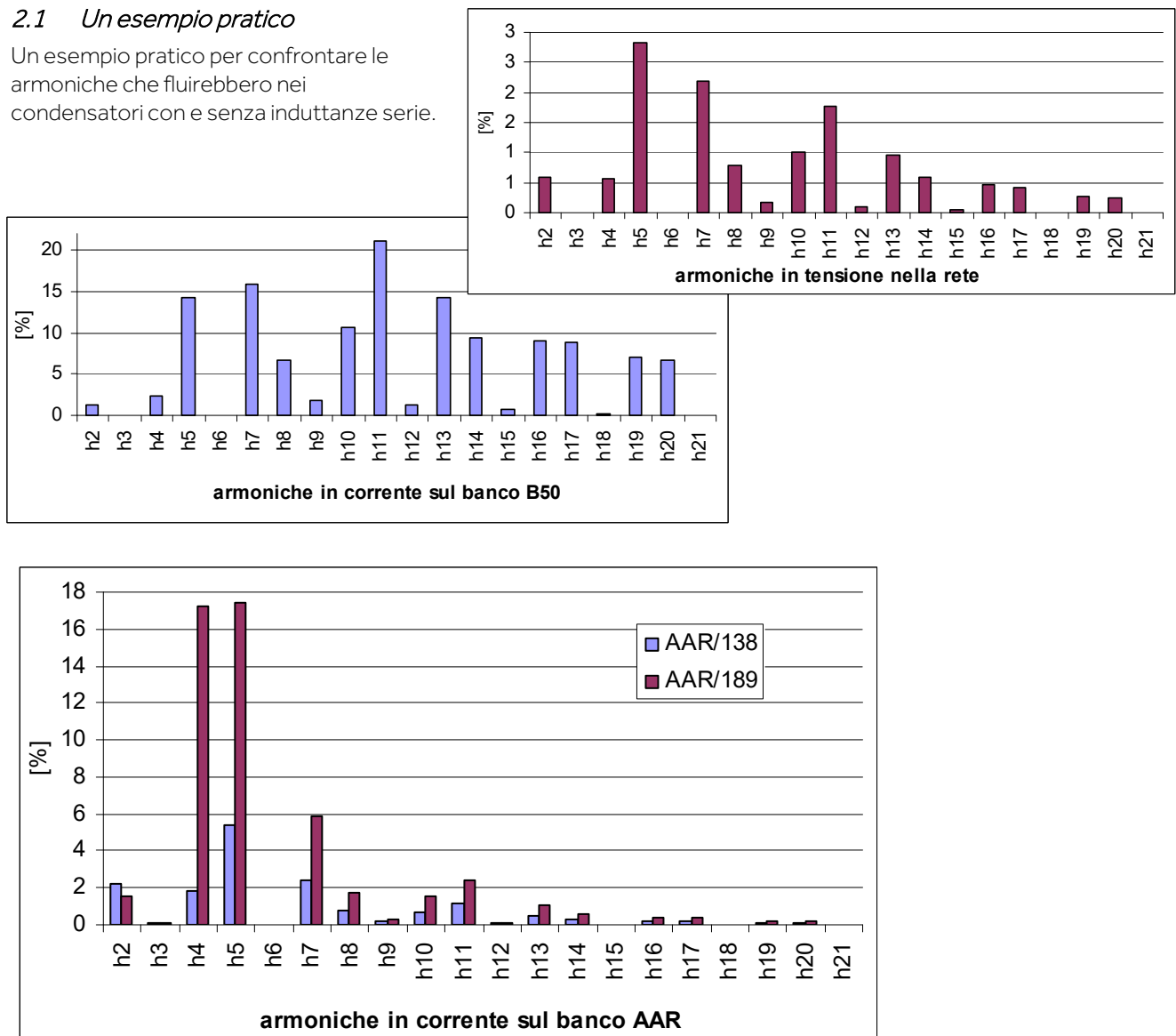
Si possono calcolare sia le correnti armoniche che fluiscono sui condensatori, sia quelle sul trasformatore. Più la potenza del trasformatore è elevata, più il coefficiente angolare della retta che rappresenta l'impedenza del trasformatore sarà basso, tendendo ad una retta orizzontale.

Semplificando i concetti, un basso contenuto di armoniche fluisce sul condensatore quando:

- la potenza del trasformatore è elevata,
- la potenza del banco è bassa,
- la frequenza di sintonia è bassa.

## 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:

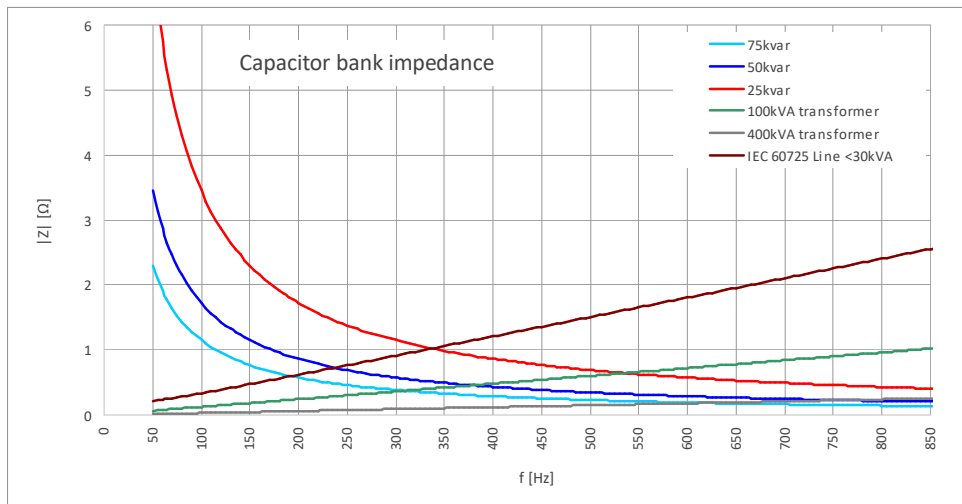
- nei casi di banchi con induttanze in serie (AAR/138 e AAR/189<sup>(1)</sup>) se paragonate alle armoniche che fluirebbero in un banco B50 senza induttanze serie;
- nei banchi con induttanze serie sintonizzate su 138 Hz, se paragonate alle armoniche che fluirebbero in un banco con induttanze sintonizzate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

Note:

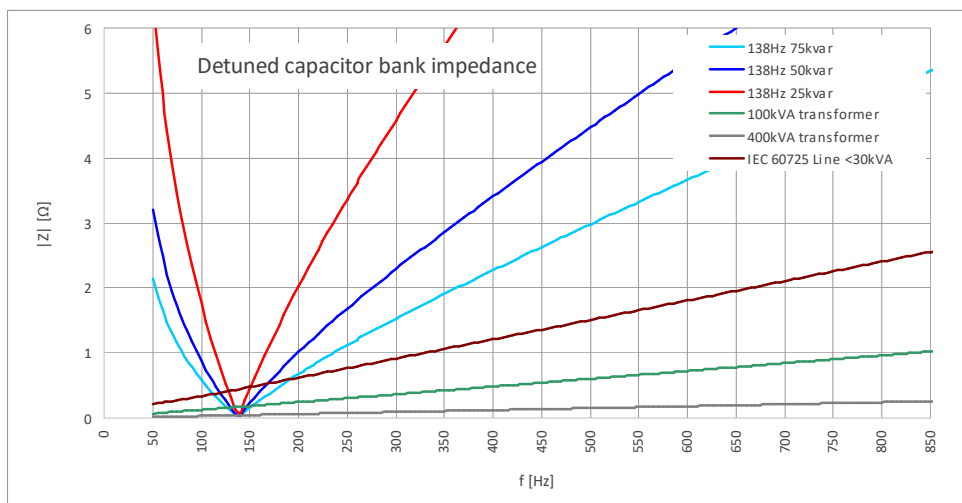
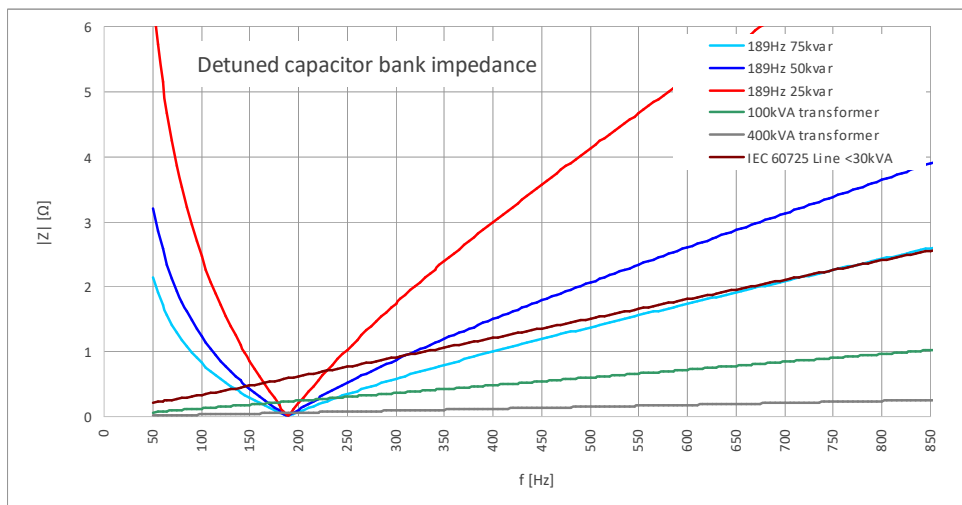
(<sup>1</sup>) la serie AAR/189 è anche denominata AAR/100

### 3 Impedenze dei banchi di condensatori a confronto

#### 3.1 Banchi senza induttanza serie, o di blocco



#### 3.2 Banchi con induttanza serie, o di blocco (desintonizzati)



### 3.3 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}) $ [ $\Omega$ ]
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}) $ [ $\Omega$ ]
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

### 3.4 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.

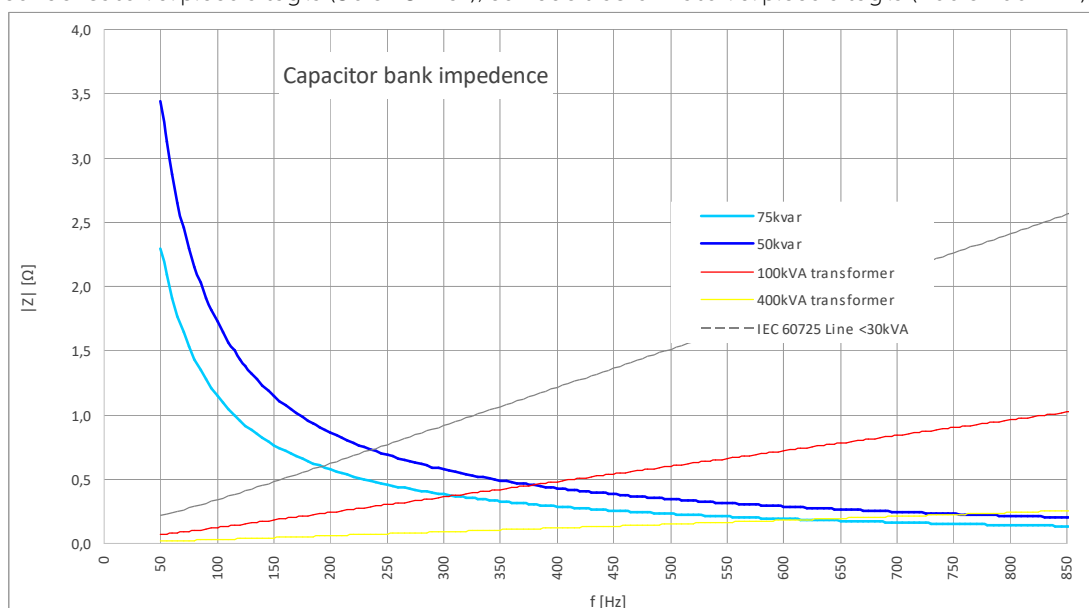
Banco di condensatori	Impedenza $ Z(350\text{Hz}) $ [ $\Omega$ ]
B50 – 25 kvar	1.0
B50 – 50 kvar	0.5
B50 – 75 kvar	0.3
AAR ft=189Hz – 25 kvar	2.4
AAR ft=189Hz – 50 kvar	1.2

Banco di condensatori	Impedenza $ Z(350\text{Hz}) $ [ $\Omega$ ]
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.

Consideriamo ad esempio il grafico riportato al paragrafo 3.1, che mostra l'impedenza a confronto di due banchi di condensatori di piccola taglia (50 e 75 kvar), con due trasformatori di piccola taglia (100 e 400 kVA).



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.

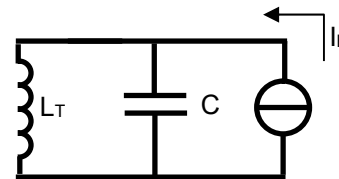
## 5 Analisi del rischio di risonanza con il trasformatore a monte

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.

Se invece di un solo trasformatore, sono presenti  $n$  trasformatori uguali in parallelo, nella trattazione che segue si possono considerare:

$$\text{potenza del trasformatore, } S = \sum_i S_i$$

$$\text{tensione di corto circuito, } U_{cc} = \sum_i \frac{U_{cc-i}}{n}$$



### 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.

$$h_r = \sqrt{\frac{X_C}{X_{SC}}} = \sqrt{\frac{P_{SC}}{Q_C}} \approx \sqrt{\frac{1}{Q_C} \cdot \frac{S_{tr}}{\frac{Z_{tr} \%}{100}}}$$

$h_r$  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

$Z_{tr} \% \equiv U_{cc} \%$

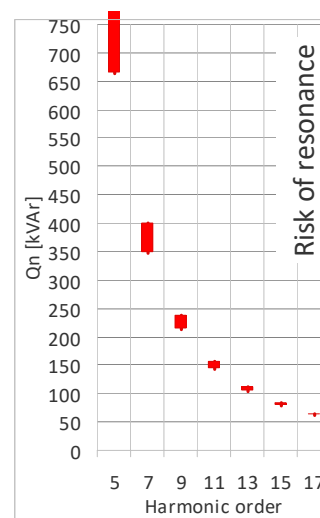
Per individuare quando una installazione è a rischio di risonanza è stato applicato il seguente procedimento:

- applicare la formula indicata sopra per tutti i valori di potenza reattiva che il quadro di rifasamento è in grado di produrre;
- ottenuti i valori corrispondenti dell'ordine di risonanza  $h_r$ , il rischio di risonanza è presente quando il valore calcolato è all'interno di una delle seguenti finestre  $h_i - 0.3 < h_r < h_i + 0.2$ ; dove  $i = 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 17, \dots$

il limite inferiore della finestra (-0.3) tiene conto anche del calo capacitivo che il condensatore ha invecchiando.

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.

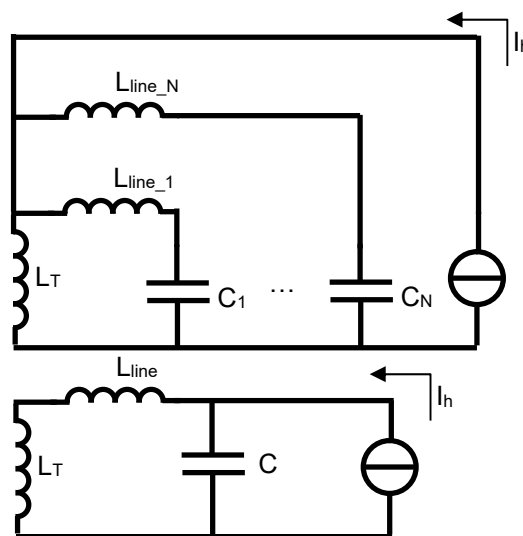
Per applicare il criterio descritto al capitolo precedente 5, si può eseguire la semplificazione mostrata a lato.

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



Valgono le seguenti formule:

$$C = \sum_i C_i ; L_{line} = \sum_i \frac{1}{L_{line\_i}}$$

Si possono considerare i seguenti valori per le linee {5}, {6}, {7}:

$L_{line}$	0.287	0.306	0.662	mH/km	@ 120 mm <sup>2</sup>
	0.258	0.293	0.605		@ 240 mm <sup>2</sup>
	0.255	0.287	0.586		@ 300 mm <sup>2</sup>

Si possono considerare i seguenti valori per i trasformatori {5}

	S [kVA]											
	3150	2500	2000	1600	1250	1000	800	630	400	315	200	100
U <sub>cc</sub> [%]	6	6	6	6	5	5	4,5	4	4	4	4	4
L <sub>T</sub> [μH]	10	12	15	19	20	25	29	32	51	65	102	204

Di conseguenza 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.

Analizzando i grafici descritti al capitolo 5, 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.

#### 5.4 Cosa serve sapere a COMAR Condensatori sull'impianto elettrico

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

o le seguenti

Potenza reattiva del banco di condensatori  $Q_c$

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

o le seguenti

$X_c$  reattanza del banco di condensatori @  $f_1$

$X_{sc}$  reattanza al corto circuito del trasformatore

Se sono presenti più apparecchiature o più trasformatori, sono necessarie le medesime informazioni per ogni apparecchiatura o trasformatore, assieme alla lunghezza ed alla tipologia dei cavi di collegamento, per poter calcolare anche la reattanza equivalente dei cavi di collegamento.

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

$G_h/S_n$	$\leq 0.1$	$\leq 0.15$	$\leq 0.3$	$\leq 0.4$	$> 0.4$	$> 0.4$	$> 0.4$	$> 0.4$
$THD_u$ [%]	$\leq 5$	$\leq 9$	$\leq 10$	$\leq 11$	$\leq 3$	$\leq 7, \leq 11$ (3)	$\leq 21$	$\leq 4, \leq 8$ (3)



THDi <sub>Cat</sub> [%]	≤ 50	≤ 70	≤ 80	≤ 90	-	-	-	-
THDi <sub>C</sub> [%]	≤ 50	≤ 70	≤ 85	≤ 85	≤ 67	≤ 67	≤ 67	≤ 67
THDi <sub>G</sub> [%]	≤ 15	≤ 25	≤ 35	≤ 40	≤ 100	≤ 100	≤ 100	≤ 100
f <sub>t</sub> [Hz]	-	-	-	-	189	189	189	135
Modello {1}	B15	B35	B50	DMP	AAR/100	AAR/6xx	AAR/D20	AAR/138

Note:

(<sup>3</sup>) 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  $f_t$  tenendo conto di quanto segue.

Tutte le correnti armoniche aventi ordine armonico  $\geq 5$  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)

Per scegliere quale sia la frequenza di sintonia più idonea, si può procedere graficamente nel seguente modo:

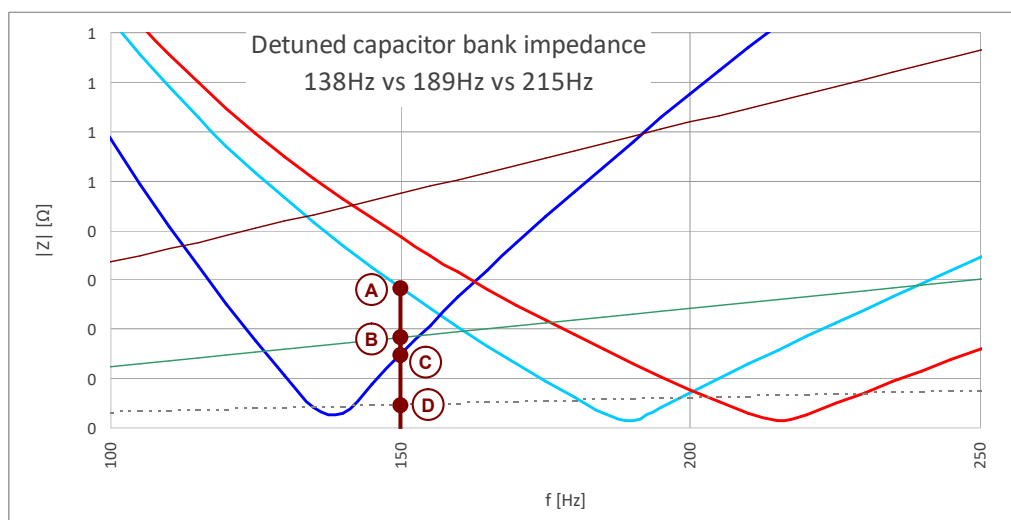
- Identificare l'armonica predominante (nell'esempio e nel grafico che segue è stata scelta la 3a armonica per semplicità).
- Identificare la potenza del trasformatore a monte:

- per potenze basse (ad esempio la linea verde del grafico che segue, che corrisponde al punto B) è preferibile scegliere una frequenza di 189Hz, meglio se superiore

*infatti l'impedenza del banco LC di condensatori sintonizzato a 138 Hz (punto C) risulta inferiore all'impedenza del trasformatore (punto B), per cui la 3a armonica tenderebbe a fluire prevalentemente sul banco di condensatori – **condizione da evitare***

- per potenze medie – alte (ad esempio la linea tratteggiata del grafico che segue, che corrisponde al punto D) è possibile scegliere una frequenza di 138 Hz, meglio se superiore

*infatti l'impedenza del banco LC di condensatori sintonizzato già a 138 Hz (punto C) risulta maggiore dell'impedenza del trasformatore (punto D), per cui la 3a armonica tenderebbe a fluire prevalentemente sul trasformatore; scegliendo una frequenza di sintonia di 189Hz, avente una impedenza maggiore (punto A), la corrente della 3a armonica fluirebbe ancora di meno nel banco di condensatori*

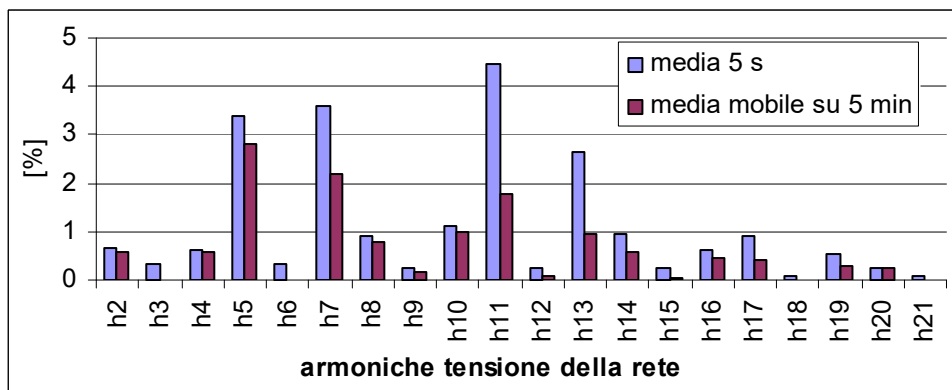


Infine, nella scelta della frequenza di sintonia considerare anche che la 3a armonica, se presente su tutte e 3 le fasi in modo bilanciato, non entrerà mai nel banco di condensatori, se privo di neutro. Sul banco di condensatori potranno solo fluire correnti di 3a armonica non bilanciate: ovvero quelle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