

IMPIANTO INDUSTRIALE CON CORRENTI DISTORTE

La presenza significativa di armoniche in corrente e tensione è sempre più frequente fra gli utilizzatori finali. Per progettare, realizzare ed utilizzare un impianto elettrico conforme alle norme tecniche CEI, anche l'aspetto della qualità dell'energia deve essere considerato. L'influenza delle armoniche nella qualità dell'energia è fondamentale. Guasti "inspiegabili" su lampade, rifasamenti, motori, trasformatori di potenza, giunzioni dei cavi, computer, macchine con forti automazioni, avviatori graduali a variazione di frequenza e molte altre apparecchiature elettroniche moderne, correnti sul neutro significative sono spesso ascrivibili alla presenza di armoniche ed alla loro possibile amplificazione da parte dei sistemi di rifasamento più tradizionali.

Per quanto riguarda lo scenario normativo riguardante le armoniche bisogna fare riferimento alla Norma CEI EN 50160, "Caratteristiche della tensione fornita dalle reti pubbliche di distribuzione dell'energia elettrica", della quale si riporta la tabella 1 riguardante i valori delle singole tensioni armoniche ai terminali di alimentazione, fino al 25° ordine, espressi in percentuale della tensione fondamentale u_1 .

Armoniche dispari				Armoniche pari	
Non multiple di 3		Multiple di 3			
Ordine h	Ampiezza relativa u_h	Ordine h	Ampiezza relativa u_h	Ordine h	Ampiezza relativa u_h
5	6,0 %	3	5,0 %	2	2,0 %
7	5,0 %	9	1,5 %	4	1,0 %
11	3,5 %	15	0,5 %	6 ... 24	0,5 %
13	3,0 %	21	0,5 %		
17	2,0 %				
19	1,5 %				
23	1,5 %				
25	1,5 %				

NOTA I valori corrispondenti alle armoniche di ordine superiore a 25 non sono indicati in questa tabella poiché essi sono generalmente piccoli ma imprevedibili a causa degli effetti di risonanza.

La CEI EN 50160 è una norma da tenere in considerazione nei progetti degli impianti utilizzatori perché può essere uno spunto per le riflessioni del progettista per limitare i problemi armonici.

Qualora talune apparecchiature avessero guasti inconsueti probabilmente si scoprirà di non essere nei limiti indicati in questa tabella.

Facciamo l'esempio di un'azienda elettromeccanica di medie dimensioni che ha installato un bel numero di apparecchiature ad azionamenti a frequenza controllata. Le macchine a controllo numerico, i grossi motori e pompe di dimensioni rilevanti hanno infatti azionamenti a frequenza variabile e quindi distorcenti.

L'azienda ha la consegna in MT (15kV), cabina dedicata con trasformatore in resina 250 kVA "basic design" con i seguenti dati principali:

Parametro	Valore di targa
V1n (tensione nominale al primario)	15000 [V]
V2n (tensione nominale al secondario)	400 [V]
Collegamento Primario / secondario - gruppo	D / yn – 11
Perdite a vuoto P0	800 [W]
Corrente a vuoto I0%	1,8%
Perdite a carico Pcc a 75°C	4400 [W]
Impedenza di cortocircuito percentuale	6%
Efficienza al 75% del carico nominale e $\cos(\varphi)=1$	98%

In un intervento di verifica sull'impianto si è eseguita una misura con analizzatore/registratore di spettro in corrente con rifasatore spento, si è evidenziato il seguente spettro armonico in [A]:

HARMONICS																								
2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	
0,0	21,7	0,0	43,3	0,0	30,9	0,0	0,0	0,0	19,2	0,0	14,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Per migliorare il fattore di potenza in passato era stata installata un'apparecchiatura tradizionale da 160 kvar a 415V di tensione nominale. Questa apparecchiatura di rifasamento con soli condensatori era costituita da cinque gradini: 20+20+40+40+40 kvar.

Nell'azienda si otteneva un $\cos(\varphi) = 0.95$ medio, in linea anche con le ultime richieste dei distributori di energia. Si riscontravano però correnti di neutro non trascurabili, problemi di durata delle lampade di illuminazione e frequenti guasti o malfunzionamenti sulle apparecchiature a controllo numerico. L'azienda doveva risolvere il problema, ma non riusciva a comprendere quale fenomeno facesse scattare le protezioni delle apparecchiature a controllo numerico e lamentava una scarsa qualità dei prodotti di illuminazione.

Il problema in realtà erano le armoniche, in modo particolare l'effetto di amplificazione dovuto al rifasamento tradizionale installato da anni sull'impianto. In effetti i condensatori del rifasamento contribuivano ad amplificare le armoniche recentemente introdotte dalle macchine a controllo numerico, peggiorando la qualità dell'energia. Nel normale funzionamento, man mano che serviva più potenza rifasante, l'effetto di amplificazione si modificava portando la risonanza parallelo proprio a coincidere con la 5° armonica in corrente.

I risultati della simulazione di quello che spesso si presenta sugli impianti sono nel seguito mostrati:

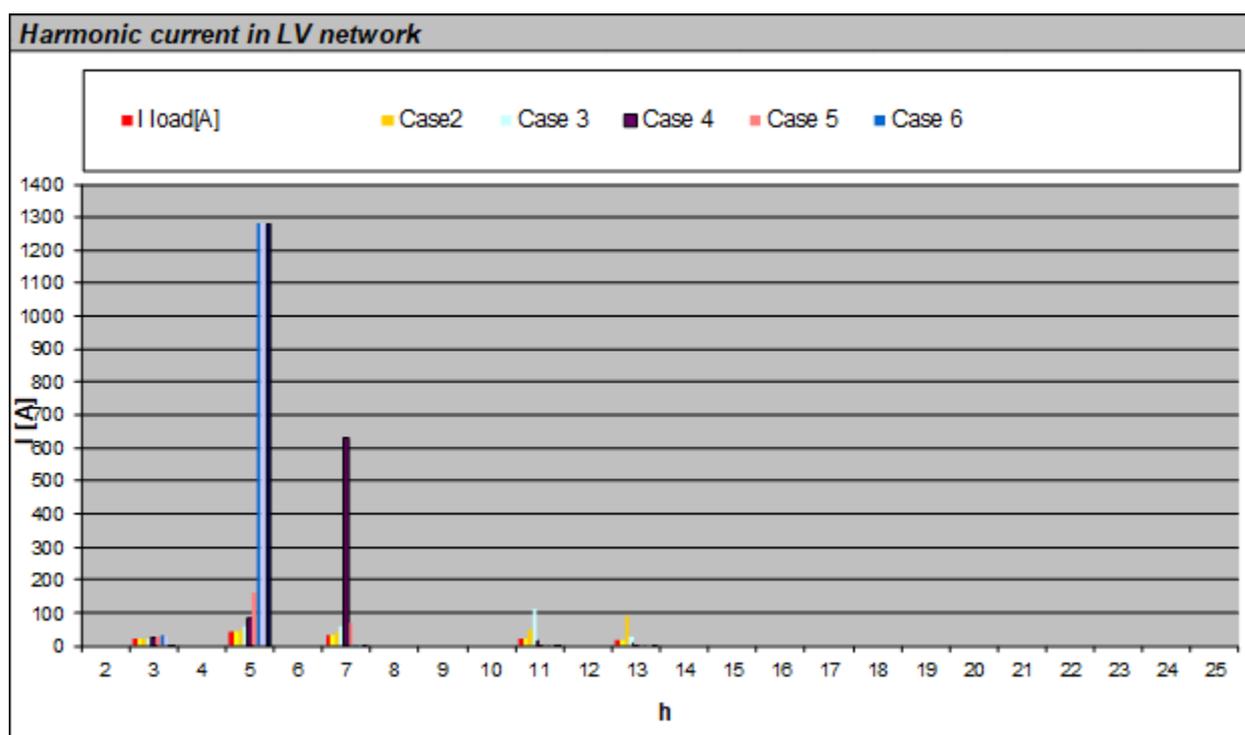


Fig.01: Andamento delle armoniche con 160 kvar inseriti.

Nel seguito si può vedere l'andamento di k, ovvero il coefficiente di amplificazione dell'armonica in scala logaritmica.

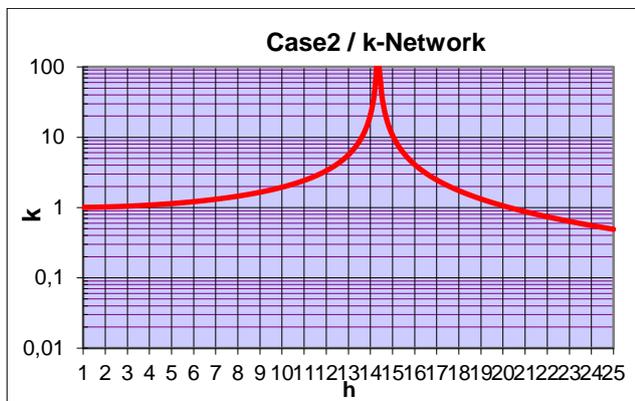


Fig. 02: amplificazione dovuta al gradino 20 kvar

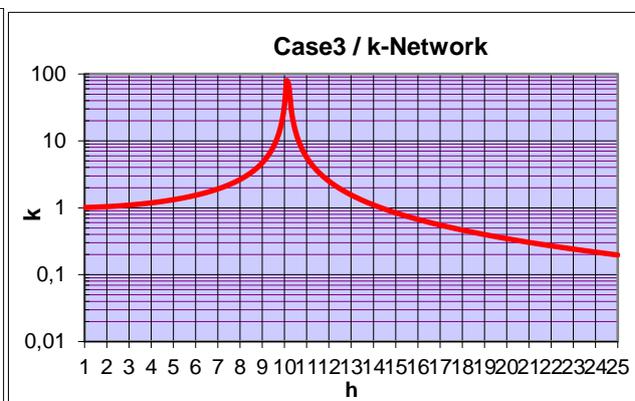


Fig. 03: amplificazione dovuta al gradino (20+20) kvar

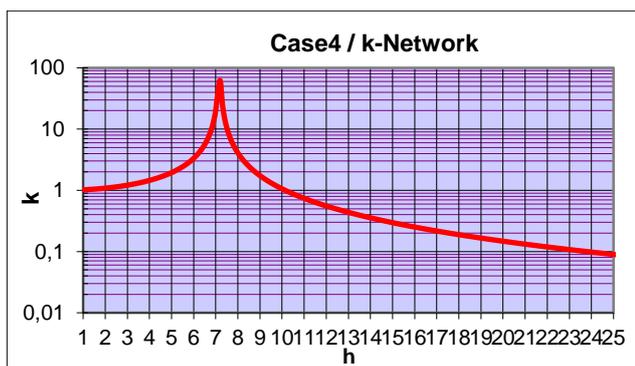


Fig. 04: amplificazione dovuta al gradino (20+20+40) kvar

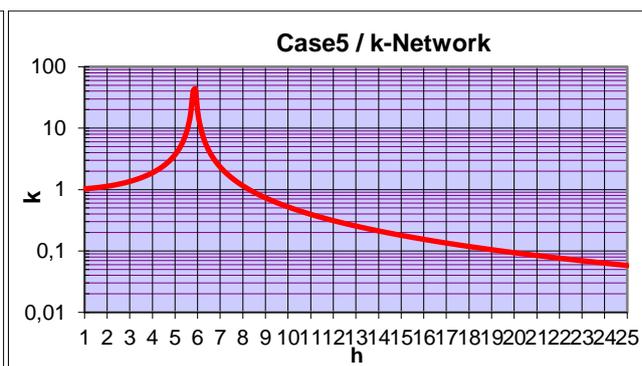


Fig. 05: amplificazione dovuta al gradino (20+20+40+40) kvar

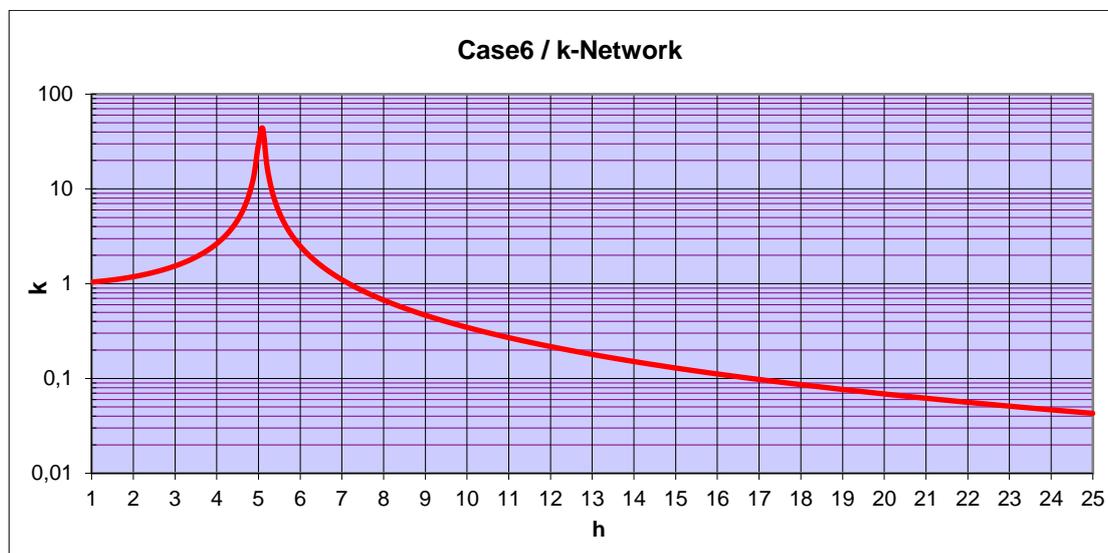


Fig. 06: amplificazione dovuta al gradino (20+20+40+40+40) kvar

Dalla figura 06 si evince che l'amplificazione delle armoniche è particolarmente "sfortunata": si amplifica di 40 volte la 5° armonica in corrente.

Per chiarire il risultato dell'effetto combinato tra rifasamento con soli condensatori ed armoniche, si riporta in forma tabulata il risultato dei calcoli.

THD EVALUATION (LV SIDE)

Order h	Harmonic distortion no PFC Connected		Harmonic distortion Case 2		Harmonic distortion Case 3		Harmonic distortion Case4		Harmonic distortion Case 5		Harmonic distortion Case6		Limit according to CEI EN 50160 in LV net
2	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	2,00
3	1,09	OK	1,14	OK	1,20	OK	1,33	OK	1,48	OK	1,68	OK	5,00
4	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	1,00
5	3,65	OK	4,15	OK	4,82	OK	7,10	!!!	13,45	!!!	107,80	!!!	6,00
6	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,50
7	3,65	OK	4,79	OK	6,96	!!!	74,34	!!!	8,48	!!!	4,02	OK	5,00
8	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,50
9	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	1,50
10	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,50
11	3,55	!!!	8,62	!!!	20,07	!!!	2,62	OK	1,40	OK	0,96	OK	3,50
12	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,50
13	3,08	!!!	17,24	!!!	4,78	!!!	1,35	OK	0,78	OK	0,55	OK	3,00
14	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,50
15	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,50
16	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,50
17	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	2,00
18	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,50
19	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	1,50
20	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,50
21	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,50
22	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,50
23	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	1,50
24	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,50
25	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	1,50
THD-V	7,06	✓	20,33	✓	22,34	✓	74,74	✓	16,05	✓	107,90	✓	8,00

Fig. 07: amplificazione dovuta ai vari inserimenti dei gradini THDv max = 107,9%

L'Azienda aveva $\cos(\varphi)$ in accordo alla legislazione vigente, ma in taluni casi i guasti si manifestavano insistentemente.

Aver capito la causa ha dato la possibilità all'azienda di risolvere il problema. Il rifasamento con soli condensatori è stato sostituito con uno più moderno adatto alla situazione circuitale. Il nuovo rifasatore è dotato di induttanze di blocco armonico e non va ad amplificare in modo significativo le armoniche presenti in impianto. In questo caso è stato scelto un rifasatore al 14% di detuned¹.

¹ Si parla di sistema di rifasamento "detuned" quando ciascun cassetto di cui è composto è provvisto di reattanze collegate in serie ai condensatori. Tali reattanze hanno spesso nucleo in ferro, sono ingombranti, pesanti, economicamente significative e hanno lo scopo di limitare i problemi riguardanti le armoniche sui rifasamenti degli impianti elettrici. Esse hanno influenza sulla scelta dei condensatori del sistema di rifasamento, non è dunque scontato che sia possibile trasformare semplicemente un rifasatore a soli condensatori in un sistema di rifasamento "detuned".

THD EVALUATION (LV SIDE)

Order h	Harmonic distortion no PFC Connected		Harmonic distortion Case 2		Harmonic distortion Case 3		Harmonic distortion Case4		Harmonic distortion Case 5		Harmonic distortion Case6		Limit according to CEI EN 50160 in LV net
2	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	2,00
3	1,09	OK	0,97	OK	0,86	OK	0,70	OK	0,59	OK	0,52	OK	5,00
4	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	1,00
5	3,65	OK	3,50	OK	3,37	OK	3,13	OK	2,92	OK	2,74	OK	6,00
6	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,50
7	3,65	OK	3,52	OK	3,41	OK	3,20	OK	3,02	OK	2,85	OK	5,00
8	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,50
9	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	1,50
10	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,50
11	3,55	!!!	3,44	OK	3,34	OK	3,15	OK	2,98	OK	2,83	OK	3,50
12	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,50
13	3,08	!!!	2,99	OK	2,90	OK	2,74	OK	2,59	OK	2,46	OK	3,00
14	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,50
15	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,50
16	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,50
17	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	2,00
18	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,50
19	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	1,50
20	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,50
21	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,50
22	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,50
23	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	1,50
24	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,50
25	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	0,00	OK	1,50
THD-V	7,06		6,81		6,58		6,16		5,80		5,47		8,00

Fig. 08: amplificazione dovuta ai vari inserimenti dei gradini THDv = 6,81%

Problema risolto e $\cos(\varphi)$ garantito.

Un sistema di rifasamento detuned, se correttamente scelto, non amplifica le armoniche presenti nell'impianto e favorisce dunque la qualità dell'energia. Di norma dunque un rifasatore detuned è economicamente più impegnativo di un rifasamento a soli condensatori, ma in taluni casi gli indubbi vantaggi tecnici giustificano il maggior investimento economico.