



L'ENERGIA CHE TI ASCOLTA.

QUALITÀ DELL'ALIMENTAZIONE ELETTRICA NEGLI IMPIANTI INDUSTRIALI



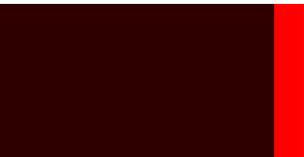


QUALITÀ DELL'ALIMENTAZIONE ELETTRICA NEGLI IMPIANTI INDUSTRIALI





La Guida sulla Qualità dell'Alimentazione Elettrica negli Impianti Industriali
è stata realizzata con la collaborazione del Nucleo Public Utilities
e del Gruppo di Lavoro sulla Qualità del Servizio di Confindustria



INDICE

1. PREMESSA	9
2. OBIETTIVI	10
3. CONCETTI DI COMPATIBILITÀ ELETTRROMAGNETICA	11
3.1 Definizioni	11
3.2 Concetti fondamentali	14
3.3 L'ambiente elettromagnetico	16
3.4 Diffusione dei disturbi condotti	18
3.5 Coordinamento dei limiti di emissione per il rispetto dei livelli di compatibilità	19
4. CARATTERISTICHE DELLA TENSIONE NELLE RETI DI DISTRIBUZIONE PUBBLICA	21
4.1 Normativa tecnica vigente	21
4.1.1 La norma CEI EN 50160	21
4.1.2 La normativa EMC	26
4.2 Regole di connessione di Enel Distribuzione	26
4.3 Monitoraggio della qualità della tensione	28
4.3.1 Caratteristiche del sistema di monitoraggio	31
5. TIPI DI APPARECCHI	31
5.1 Criteri per la valutazione dei livelli di emissione	31
5.1.1 Flicker	32
5.1.2 Armoniche	34

5.2	Provvedimenti per limitare le emissioni	35
5.2.1	<i>Limitazione delle variazioni rapide di tensione di origine interna all'impianto utilizzatore</i>	37
5.2.2	<i>Compensazione del Flicker</i>	38
5.2.3	<i>Limitazione delle armoniche</i>	39
6.	APPARECCHI E PROCESSI SENSIBILI	42
6.1	Tipi di apparecchi sensibili	42
6.2	Provvedimenti per contenere gli effetti dei disturbi	46
6.3	Processi sensibili	49
7.	CRITERI PER LA REALIZZAZIONE DEGLI IMPIANTI	51
7.1	Concezione dell'impianto utente	51
7.1.1	<i>Classificazione degli utilizzatori</i>	51
7.1.2	<i>Schemi elettrici d'impianto</i>	52
7.1.3	<i>Protezioni e loro coordinamento</i>	53
7.2	Isolamento	54
7.3	Manutenzione	55
8.	CRITERI DI SCELTA DELLE APPARECCHIATURE RELATIVAMENTE AI LIVELLI DI IMMUNITÀ	58
8.1	Apparecchiature di potenza	58
8.2	Apparecchiature elettriche/elettroniche di controllo, di misura e di trasmissione	63
8.2.1	<i>Livelli di immunità ai disturbi</i>	63
8.2.2	<i>Livelli di isolamento</i>	64

9. APPARECCHIATURE PER LA LIMITAZIONE DEI DISTURBI DA INSTALLARE NEGLI IMPIANTI	65
9.1 Gruppi di Continuità (UPS: Uninterruptible Power Systems)	65
9.1.1 Gruppi di continuità statici	67
9.1.2 Gruppi di continuità rotanti ed ibridi	73
9.2 Trasformatori Ferrorisonanti (CVTS Constant Voltage Transformers)	75
9.3 Installazione di dispositivi innovativi basati sull'elettronica di potenza per la compensazione dei disturbi	77
<i>APPENDICE A: Caratteristiche della tensione fornita dalle reti pubbliche di distribuzione</i>	81
<i>APPENDICE B: Livelli di compatibilità per la rete industriale</i>	97
<i>APPENDICE C: Origine ed effetti dei disturbi</i>	100



La nuova guida sulla qualità dell'alimentazione elettrica nelle utenze industriali è il risultato di una consolidata collaborazione tra Confindustria ed Enel che oggi, alla luce dei rilevanti cambiamenti nel settore dell'energia e di fronte alle sfide che questi portano con sé, deve più che mai sviluppare le proprie potenzialità.

L'energia, in tutti i suoi aspetti: disponibilità, prezzo e qualità, rappresenta un elemento essenziale per la competitività del nostro sistema industriale. In particolare, continuità e affidabilità dell'alimentazione hanno grande rilevanza nella quotidianità del lavoro d'impresa e meritano una seria e costante attenzione.

I grandi quantitativi di energia richiesta, gli elevati standard qualitativi dei prodotti industriali e la complessità dei processi di produzione hanno notevolmente accresciuto l'importanza della qualità dell'alimentazione elettrica che rappresenta un tratto non secondario della fornitura.

Per questi motivi ed in ragione di una regolamentazione moderna ed evoluta, Confindustria ed Enel hanno ritenuto importante richiamare l'attenzione sui principali fattori di influenza della qualità del servizio e fornire, attraverso questo strumento di divulgazione tecnica, informazioni e indicazioni utili agli associati e a tutti gli operatori.

La collaborazione tra il mondo dell'impresa e gli operatori del settore elettrico è essenziale per il costante miglioramento della qualità del servizio. Ci auguriamo che la presente pubblicazione, come già la sua prima edizione del 1994, possa confermarsi un valido riferimento per quanti vogliono rendere più efficiente l'attività produttiva di tutti i giorni.

Piero Gnudi
Presidente Enel



Emma Marcegaglia
Vice Presidente Confindustria
per l'Impresa e il Territorio





1. PREMESSA

La qualità del servizio elettrico prende in considerazione:

- la continuità dell'alimentazione, intesa come assenza di interruzioni nella fornitura di energia elettrica;
- la qualità della tensione, intesa come qualità della forma d'onda (ampiezza, frequenza, variazioni, ecc.).

Esistono numerosi fattori che influiscono sulla qualità dell'energia elettrica ed in particolare:

- dipendenti dal Distributore (gestione ed esercizio della rete, manutenzione, ...);
- dipendenti dal Cliente (guasti presso impianto del Cliente, disturbi emessi sulla rete, ...);
- indipendenti (fattori ambientali, eventi atmosferici, danni prodotti da Terzi, ...).

Consapevoli dell'importanza che l'energia elettrica riveste nell'economia del sistema paese, l'Enel e la Confindustria hanno avviato un ampio programma di collaborazione che comprende, tra gli obiettivi di maggiore rilevanza, una capillare azione di informazione e di indirizzo per i Clienti sugli aspetti tecnici della qualità del servizio elettrico.

La presente pubblicazione, aggiornamento della precedente edizione del 1994, è stata concepita e sviluppata con lo scopo di offrire un quadro generale di indirizzi e di suggerimenti utili per la corretta progettazione delle reti di utenza e per la scelta del macchinario di processo che tengano conto delle perturbazioni normalmente presenti sulle reti di distribuzione dell'energia elettrica la cui numerosità può essere ridotta con adeguati interventi, ma mai completamente eliminata.

Il miglioramento della qualità del servizio impone un approccio integrale al problema. A tal fine, la rete elettrica deve essere considerata come un sistema unico che vede coinvolti non solo i soggetti operanti nel settore della produzione, trasporto e distribuzione dell'energia elettrica, ma anche i Clienti responsabili di una adeguata scelta degli apparecchi utilizzatori e della corretta progettazione, installazione, gestione e manutenzione degli apparati stessi e delle reti d'utenza. A tale scopo, si ritiene opportuno anche che gli organismi preposti all'elaborazione della normativa tecnica degli apparati utilizzatori e delle macchine operatrici prescrivano adeguati livelli di immunità ai disturbi per non amplificare le conseguenze sul processo produttivo di perturbazioni anche molto brevi presenti sulle reti.

La conoscenza della sensibilità del processo industriale ai disturbi elettrici, da un lato, e delle performance di rete attese nel contesto in cui il processo opera, dall'altro, sono i fattori chiave per un'analisi dei costi e dei benefici degli interventi desensibilizzanti volti al conseguimento di un determinato livello di qualità del servizio.

2. OBIETTIVI

La presente pubblicazione intende fornire ai Clienti industriali alimentati in Alta Tensione (tensione maggiore di 35 kV) e Media Tensione (tensione compresa tra 1 kV e 35 kV):

- la descrizione delle principali caratteristiche dell'alimentazione elettrica delle reti di distribuzione;
- la caratterizzazione dell'ambiente elettromagnetico in cui l'impianto utilizzatore si trova ad operare;
- la formulazione di suggerimenti per la scelta degli apparecchi e dei componenti di impianto, fornendo un quadro generale dei parametri che ne caratterizzano le prestazioni dal punto di vista della compatibilità elettromagnetica;
- l'indicazione dei provvedimenti in grado di ridurre l'emissione di disturbi sulla rete pubblica da parte degli impianti utilizzatori.

In questa ottica, le indicazioni tecniche in essa contenute, oltre che costituire il presupposto per una più efficace azione di tutti i soggetti coinvolti al mantenimento di adeguati livelli qualitativi dell'alimentazione elettrica, possono rappresentare un utile contributo alla definizione di future soluzioni anche contrattuali che, in uno spirito di reciproca collaborazione, definiscano gli impegni di ciascuna delle parti sia in merito alla qualità dell'alimentazione fornita sia in relazione al controllo dei disturbi da parte degli utenti (ad esempio i "Contratti per la Qualità" previsti dall'Autorità dell'Energia Elettrica ed il Gas).

La qualità dell'alimentazione elettrica delle reti di distribuzione è regolata dalle delibere dell'Autorità per l'Energia Elettrica ed il Gas e coinvolge:

- la durata media cumulata delle interruzioni per Cliente BT;
- il numero delle interruzioni lunghe senza preavviso per i clienti di "maggiori dimensioni" (AT ed MT).

Poiché la qualità del servizio è un concetto che coinvolge l'intero sistema elettrico, comprendendo sia la rete di distribuzione che la rete d'utenza, essa presuppone il coinvolgimento e la partecipazione del Cliente attraverso: la scelta dello schema di allacciamento più consono al livello di qualità richiesto dal processo industriale, il rispetto delle regole di allacciamento emesse dal Distributore, il coordinamento delle protezioni del Cliente con quelle del Distributore, e la corretta progettazione, realizzazione, manutenzione e gestione degli impianti del Cliente.

3. CONCETTI DI COMPATIBILITÀ ELETTROMAGNETICA

La definizione della strategia di contenimento dei disturbi ha mosso i primi passi sin da quando l'alimentazione elettrica si è affermata come servizio generalizzato, essenzialmente sotto la forma di criteri di allacciamento di carichi particolari, la cui tipologia si è andata progressivamente allargando.

Le normative nazionali e internazionali hanno seguito questa evoluzione sviluppando un'azione a vasto raggio, che ha inquadrato in modo coerente il problema per tutti i disturbi legati ai fenomeni di natura elettromagnetica.

Il lavoro normativo si svolge sotto il titolo generale di Compatibilità Elettromagnetica (EMC) e, anche se esso è ancora in corso, si è consolidata una metodologia che consente di risolvere una larga parte del problema dei disturbi.

3.1 Definizioni

Al fine di meglio illustrare la problematica della EMC, si riportano le seguenti definizioni:

Ambiente elettromagnetico

Insieme dei fenomeni elettromagnetici presenti in un determinato ambiente.

Compatibilità elettromagnetica (EMC)

Capacità di un dispositivo o di un'apparecchiatura o di un sistema di funzionare correttamente nel relativo ambiente elettromagnetico, senza introdurre disturbi intollerabili nell'ambiente stesso o provarli agli altri apparecchi ivi presenti.

Disturbi condotti

I disturbi condotti sono alterazioni dell'ampiezza o della forma d'onda della tensione che, prodotti da una sorgente, si propagano lungo una rete di alimentazione, viaggiando sui conduttori di linea e in alcuni casi anche attraverso i trasformatori, per cui possono anche trasferirsi tra reti a differente livello di tensione.

Questi disturbi possono degradare il funzionamento di un dispositivo, apparecchio o sistema e anche provocare danni se i loro livelli sono eccessivi.

I disturbi considerati in questa guida sono:

- variazioni di tensione
- fluttuazioni di tensione
- buchi di tensione
- sovratensioni
- squilibri di tensione
- armoniche
- interarmoniche

Disturbo elettromagnetico

Fenomeno elettromagnetico che può degradare la prestazione di un dispositivo, di un'apparecchiatura o di un sistema.

Emissione

Processo attraverso il quale viene emesso un determinato disturbo da una sorgente. Sebbene le sorgenti dei disturbi siano sempre singoli dispositivi o apparecchi, ai fini della presente guida l'emissione è sempre riferita al punto di accoppiamento comune, come risultato globale del funzionamento dell'impianto utilizzatore.

Immunità

Capacità di un dispositivo, apparecchiatura o sistema di funzionare senza degrado delle prestazioni in presenza di un determinato disturbo elettromagnetico.

Limite di emissione

Livello massimo tollerabile di emissione di un disturbo elettromagnetico da una sorgente.

Livello di compatibilità elettromagnetica

Valore specificato di un disturbo elettromagnetico, che ha alta probabilità di non essere superato (95%, salvo diversa indicazione) applicato a un dispositivo, apparecchiatura o sistema. Tale livello costituisce un livello di riferimento che consente di determinare sia i requisiti di immunità di dispositivi, apparecchi e sistemi nell'impianto utilizzatore che le loro emissioni.

Livello di pianificazione

Valore specificato di un disturbo elettromagnetico usato a fini della pianificazione dell'impatto sul sistema elettrico di tutti i disturbi, originati da installazioni o da carichi di grande potenza. I livelli di pianificazione, definiti dal fornitore di energia elettrica, sono valori indicativi generalmente uguali od inferiori a quelli di compatibilità, usati normalmente per il coordinamento delle emissioni nella determinazione delle quote concesse agli utenti.

Livello di immunità

Valore specificato di un disturbo elettromagnetico per il quale un dispositivo, apparecchiatura o sistema è capace di operare, con alta probabilità, al grado di prestazione richiesta. Il livello di immunità rappresenta il valore di prova al disturbo per ogni tipo di apparecchiatura.

Livello di disturbo

Valore di un disturbo elettromagnetico misurato in modo specificato.

Livello di emissione

Livello di un determinato disturbo elettromagnetico emesso da una sorgente, misurato in modo specificato.

Punto di accoppiamento comune (PAC - PAI)

La descrizione dell'ambiente elettromagnetico comporta la definizione dei "punti di comune accoppiamento" nei quali è necessario rispettare i livelli di compatibilità:

- punto di accoppiamento comune con la rete pubblica (PAC) di un'utenza, definito come il punto della rete di alimentazione pubblica elettricamente più prossimo all'utenza, in cui sono o potranno essere collegati altri utenti.
- punto di accoppiamento in impianto (PAI), definito come il punto di una rete di distribuzione interna ad un impianto utilizzatore, elettricamente più vicino ad un carico particolare, al quale possono o potrebbero essere collegati altri carichi.

Sorgente

Singolo dispositivo o apparecchiatura o sistema nel suo complesso.

Suscettibilità

Degrado delle prestazioni di un dispositivo, apparecchiatura o sistema causata da un determinato disturbo elettromagnetico.

Valutazione statistica delle grandezze elettriche di riferimento

Salvo diversa indicazione, i valori delle grandezze elettriche nel seguito riportati sono da intendersi come valori che hanno una probabilità del 95% di non essere superati. La valutazione di tale probabilità è effettuata in base a criteri ben definiti che possono variare in relazione al disturbo considerato.

3.2 Concetti fondamentali

Gli aspetti che vengono studiati in ambito EMC riguardano:

- l'emissione dei disturbi
- la propagazione dei disturbi
- la suscettibilità ai disturbi di dispositivi, apparecchiature e sistemi

Per quanto riguarda l'emissione, generalmente gli apparecchi definiti "**disturbanti**" (utilizzatori o componenti del sistema di distribuzione dell'energia elettrica), sono caratterizzati da un **livello di disturbo** iniettato nel sistema di alimentazione, variabile nel tempo.

Per quanto riguarda la **propagazione**, ogni singola emissione, in relazione alla sua natura, può propagarsi verso le apparecchiature sensibili per via condotta o irradiata. In particolare sono di tipo:

- **condotto**, i disturbi che arrivano alle apparecchiature attraverso le linee di alimentazione elettrica e i collegamenti di controllo/segnalazione;
- **irradiato**, i disturbi che interessano direttamente le apparecchiature attraverso la propagazione di campi elettromagnetici.

Per quanto riguarda la **suscettibilità**, ogni apparecchio definito **sensibile** è caratterizzato da un rischio di mal funzionamento o danneggiamento in funzione del livello di disturbo.

Va tenuto tuttavia presente che alcune apparecchiature possono essere contemporaneamente sia disturbanti che sensibili

La natura sia dell'emissione sia della suscettibilità è intrinsecamente statistica: infatti l'emissione presenta una variabilità temporale e locale (in alcuni casi di natura casuale), la suscettibilità presenta una variabilità in quanto i prodotti di una stessa linea di produzione presentano delle deviazioni rispetto allo standard di progetto.

Tenendo presente le numerose sorgenti di emissioni esistenti in una rete di distribuzione (più apparecchi disturbanti per singolo impianto utilizzatore, presenza di diverse utenze disturbanti, più componenti disturbanti facenti parte della rete) e che la rete di distribuzione costituisce il mezzo di composizione dei disturbi, l'insieme dei contributi può dar luogo a un **livello totale di disturbo** in rete troppo elevato e non compatibile con il buon funzionamento delle apparecchiature sensibili a essa allacciate. Poiché le singole emissioni sono di natura statistica anche il livello totale di disturbo è della stessa natura.

Al fine di assicurare la compatibilità tra carichi disturbanti e carichi sensibili in una rete elettrica di alimentazione, è allora necessario introdurre:

- per la rete, dei livelli "massimi" di disturbo, detti **livelli di compatibilità**
- per le singole apparecchiature o sistemi, dei livelli di disturbo che un apparecchio o sistema deve poter sopportare senza degrado delle sue prestazioni, detti **livelli di immunità**.

Al fine di ridurre il rischio di mal funzionamento dell'apparecchiatura o del sistema, è necessario assicurare un margine opportuno tra i livelli di compatibilità e di immunità scegliendo un livello di immunità maggiore del livello di compatibilità.

Il rispetto dei livelli di compatibilità sulla rete pubblica è ottenuto fissando dei **limiti di emissione** per le singole apparecchiature e/o per gli impianti utilizzatori, sulla base di opportuni criteri, definiti dalla normativa e dalle specifiche di allacciamento adottate dal Distributore.

I concetti di coordinamento EMC sopra esposti sono illustrati in termini deterministici in **FIG.3-1** e in termini probabilistici in **FIG.3-2**.

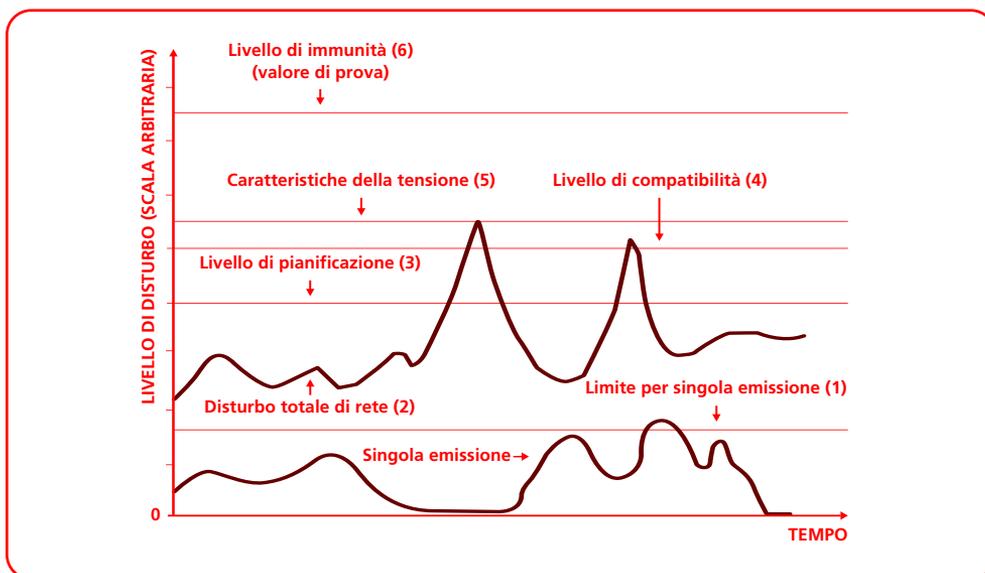


FIG.3-1 Rappresentazione deterministica del coordinamento tra livelli di emissione (1), disturbo totale (2), pianificazione (3), compatibilità (4) e immunità (6)

di apparecchiature molto sensibili ai disturbi (per es.: strumentazione di laboratorio, alcuni elaboratori, sistemi di automazione...) e richiede interventi particolari quali, per esempio, il ricorso a gruppi di continuità assoluta o l'adozione di filtri adeguati.

• **Classe 2:**

Si applica in genere ai PAC ed ai PAI negli ambienti industriali e di altre reti non pubbliche. I livelli di compatibilità di questa classe sono gli stessi della rete pubblica: in questa classe si intende considerare l'impiego di quelle apparecchiature che sono utilizzate anche nella rete pubblica.

• **Classe 3:**

Si applica solo ai PAI all'interno della rete industriale. Questa classe ha, in genere, livelli più alti di quelli della Classe 2. Essa è tipica delle seguenti situazioni:

- una gran parte del carico rappresentato da convertitori
- presenza di sistemi di saldatura
- presenza di motori con frequenti avviamenti
- presenza di carichi rapidamente variabili.

In FIG.3-3 si riporta una rappresentazione schematica di quanto detto.

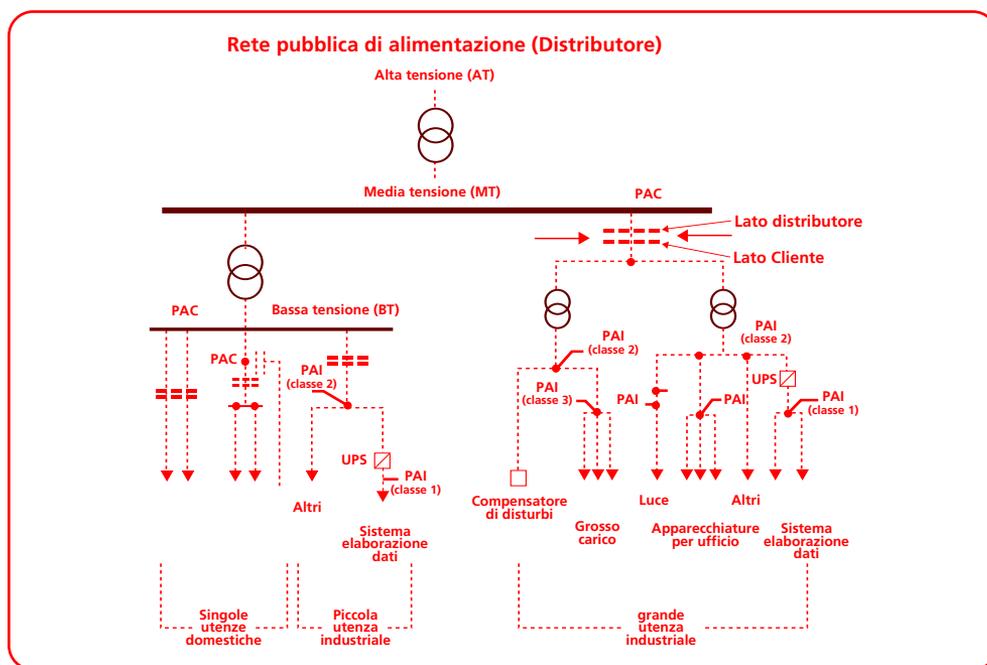


FIG. 3-3 Esempio di rete pubblica che alimenta installazioni domestiche ed industriali: rappresentazione dei PAC, dei PAI e delle 3 classi di ambiente elettromagnetico per reti industriali

3.4 Diffusione dei disturbi condotti

Un impianto utilizzatore con carichi disturbanti oltre a disturbare se stesso, inquina la rete pubblica, che trasferisce i disturbi agli altri utilizzatori.

I disturbi trasferiti sono quelli classificati come "condotti" e la conoscenza delle loro caratteristiche di propagazione costituisce un caposaldo del coordinamento EMC.

In relazione alla propagazione dei disturbi condotti tra i vari livelli di tensione dei sistemi di trasmissione/distribuzione, è importante sottolineare che i livelli di compatibilità indicati per le reti di Alta e Media Tensione sono il risultato finale del processo di coordinamento.

Per la Bassa Tensione essi hanno sempre un riferimento preciso all'immunità richiesta per gli apparecchi elettrici ed elettronici e quindi si riflettono nelle norme costruttive di tali apparecchi. Per gli altri livelli di tensione hanno significato di valori obiettivo, in relazione ai quali vengono stabiliti i limiti di emissione e le caratteristiche di immunità degli apparecchi direttamente alimentati, che non sono generalmente specificati nelle norme.

La FIG.3-4 schematizza il processo di generazione e diffusione dei disturbi con riferimento alla interazione tra rete elettrica pubblica e impianto utilizzatore.

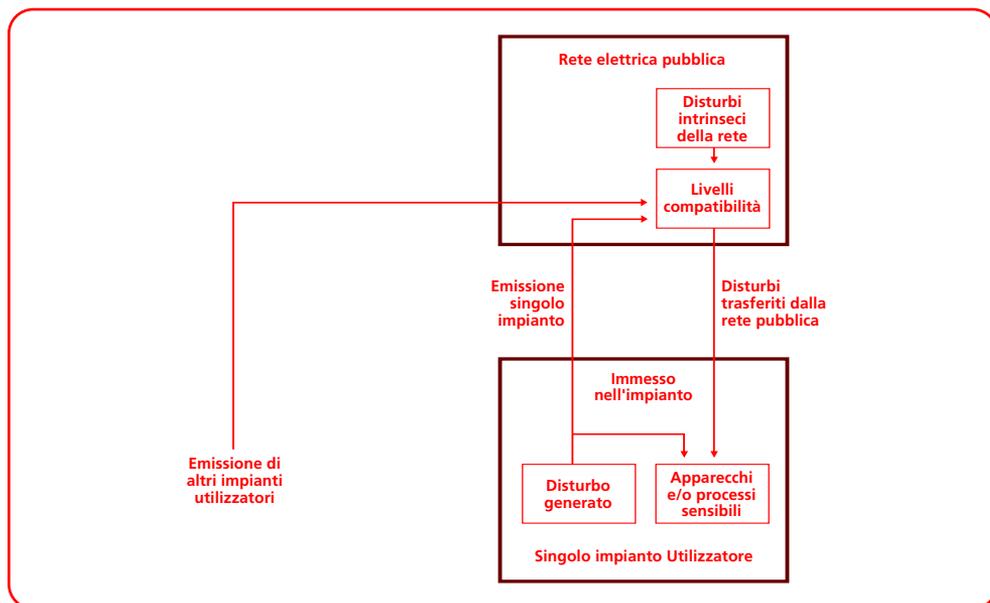


FIG. 3-4 Schematizzazione del processo di generazione e diffusione dei disturbi condotti

3.5 Coordinamento dei limiti di emissione per il rispetto dei livelli di compatibilità

Poiché i disturbi condotti possono trasferirsi fra gli stadi di rete a diverso livello di tensione, il loro contenimento entro limiti accettabili può essere ottenuto solo attraverso un coordinamento globale.

Tale coordinamento dipende dalla struttura del sistema di distribuzione e dalla densità dei carichi disturbanti presenti e/o attesi in una data rete e quindi può essere eseguito solo dal Distributore di energia elettrica, sulla base dei livelli di compatibilità fissati per gli stadi AT, MT e BT.

I limiti di emissione debbono essere stabiliti per impianto utilizzatore e non per i singoli apparecchi disturbanti, in quanto anche se i carichi disturbanti presenti in un impianto utilizzatore soddisfano i limiti di emissione prescritti nelle norme relative alle apparecchiature ("norme di prodotto"), è possibile che la loro concentrazione sia tale da si rendano necessari provvedimenti di compensazione da parte dell'utente.

A questo fine occorre estendere la concezione classica degli studi di allacciamento in funzione della capacità di alimentazione della rete (potenza ed energia) anche alla capacità di consentire l'emissione di disturbi entro i limiti adeguati derivanti dalla necessità di rispettare i livelli di compatibilità.

La capacità di alimentazione di una rete di distribuzione è limitata da vincoli di tenuta termica di conduttori e trasformatori, dalla necessità di contenere le cadute di tensione entro limiti che consentano di rispettare le condizioni di fornitura e da criteri economici, legati al costo delle perdite.

La capacità di assorbire disturbi è legata alla impedenza equivalente della rete vista al PAC, ovvero alla potenza di cortocircuito esistente nel nodo.

Infatti i livelli risultanti di alcune tra le forme di disturbo condotto più importanti e cioè le variazioni rapide di tensione, il flicker e la distorsione armonica, dipendono strettamente oltre che dagli assorbimenti variabili di corrente effettuati dai carichi o dalla ampiezza delle correnti armoniche iniettate sulla rete, anche dalla potenza di cortocircuito e dalla struttura della rete di alimentazione.

Al variare della posizione sulla rete del punto di accoppiamento comune, variano quindi sia la capacità di alimentazione che quella di consentire l'emissione di disturbi.

Tra le cause di variabilità della potenza di cortocircuito e quindi dell'impedenza equivalente della rete, oltre alla "posizione" sulla rete del punto di accoppiamento comune, occorre considerare



anche il fatto che la stessa configurazione della rete è soggetta a cambiamenti a causa della necessità di garantire un'adeguata continuità del servizio (rialimentazioni in MT a seguito di guasti, lavori di manutenzione e costruzione, ecc.).

Per stabilire un criterio di equa ripartizione dei limiti di emissione tra diversi utenti in rapporto ai livelli di compatibilità, la considerazione fondamentale è che così come ogni utente sfrutta una quota della capacità di alimentazione disponibile nel punto di accoppiamento comune egli possa produrre un'emissione di disturbo non superiore a una quota del livello di pianificazione. La quota può essere determinata in base al rapporto tra la potenza sottoscritta dai clienti e la capacità di alimentazione della rete. Questo concetto si è fatto strada in sede internazionale ed è alla base dei criteri di determinazione dei livelli di emissione riportati nei due documenti relativi ai disturbi prodotti da carichi distorti e fluttuanti allacciati alle reti AT ed MT (**IEC/TR 61000-3-6** e **IEC/TR 61000-3-7**¹)

Nella determinazione dei limiti di emissione è possibile mantenere una certa flessibilità, in relazione alla specifica situazione esistente o prevedibile a breve/medio termine sulla rete; quindi in alcuni casi possono essere concessi inizialmente a un impianto utilizzatore dei limiti di emissione più elevati di quelli strettamente spettanti, a condizione che l'utente si impegni a ridurre la propria emissione, non appena l'evoluzione dei carichi disturbanti sulla rete lo richieda.

Questa procedura consente all'utente di graduare nel tempo l'impiego dei mezzi di contenimento dei disturbi o l'introduzione di vincoli sui cicli di funzionamento degli apparecchi disturbanti, al Distributore di graduare nel tempo le eventuali soluzioni di allacciamento adeguate alle necessità dell'utente stesso nel rispetto dei livelli di compatibilità.

¹ **IEC/TR 61000-3-6**: "Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3: Limits - Section 6: Assessment of emission limits for distorting loads in MV and HV power systems";
IEC/TR 61000-3-7: "Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3: Limits - Section 7: Assessment of emission limits for fluctuating loads in MV and HV power systems".

4. CARATTERISTICHE DELLA TENSIONE NELLE RETI DI DISTRIBUZIONE PUBBLICA

4.1 Normativa tecnica vigente

Il rispetto dei livelli di compatibilità per le reti di trasmissione e distribuzione ed il coordinamento dell'emissione dei disturbi nelle reti deve essere affrontato e risolto con la collaborazione di tutte le parti in causa, ovvero:

- enti normativi e regolatori a livello nazionale ed internazionale;
- distributori di energia elettrica;
- gestori delle reti di trasmissione nazionali;
- costruttori di apparecchi utilizzatori e di apparati;
- clienti;
- progettisti e consulenti;
- installatori.

Il problema dei disturbi e della compatibilità elettromagnetica è affrontato a livello nazionale ed internazionale da vari organismi tecnici e normativi, tra cui:

- CEI (Comitato Elettrotecnico Italiano)
- CENELEC (Comitato Europeo per la Normalizzazione Elettrotecnica)
- CIGRE (Conference International del Grand Réseaux Electriques)
- IEC (International Electrotechnical Commission)
- UIE (International Union for Electroheat)
- UNIPED (Union des Producteurs et des Distributeurs d'Energie Electricque)

In generale, compito della normativa è sia quello di definire livelli di compatibilità per il disturbo in rete (livelli che non devono essere mai superati), stabilendo altresì criteri per la valutazione dei limiti di emissione a partire da opportuni valori di pianificazione, sia, per i singoli apparecchi utilizzatori, fissare limiti di emissione e livelli di immunità.

4.4.1 La Norma CEI EN 50160

Nell'ambito della normativa relativa alla qualità del servizio, un posto particolare merita la norma "**CEI EN 50160: Caratteristiche della tensione fornita dalle reti pubbliche di distribuzione dell'energia elettrica**".

Tale norma infatti, nata e sviluppata a livello europeo, prende in considerazione il tema della

qualità dell'alimentazione elettrica per fornire condizioni di alimentazione soddisfacenti al funzionamento delle apparecchiature dell'utente e, allo stesso tempo, di evitare aumenti di costo non necessari nella fornitura di energia elettrica.

La norma limita il suo campo alla sola "fornitura" di energia elettrica, escludendo la definizione di livelli di compatibilità, di emissione, o di immunità, per le apparecchiature ma, considerando l'energia elettrica come un "prodotto" con particolare natura, definisce e descrive i limiti e i valori massimi attesi entro cui gli utenti possono aspettarsi che rimangano contenute le caratteristiche della tensione fornita dalle reti pubbliche di distribuzione a Media e Bassa Tensione.

Occorre, comunque, notare che le caratteristiche della tensione all'interno dell'impianto dell'utente possono essere diverse da quelle ai terminali di fornitura per fattori dipendenti dalle modalità realizzative degli impianti utente stessi. È responsabilità dell'utente valutare opportunamente, sulla base di criteri di convenienza tecnico-economica, le azioni da mettere in atto per desensibilizzare il proprio processo produttivo da disturbi dell'alimentazione elettrica normalmente presenti sulle reti di distribuzione.

La norma è applicabile solo in condizioni di esercizio normali² escludendo ogni condizione al di fuori del controllo del fornitore, quali:

- condizioni climatiche eccezionali ed altri disastri naturali;
- interferenze da parte di terzi;
- azioni industriali (soggette a obblighi legali);
- forza maggiore;
- deficit di potenza dovuti ad eventi esterni;
- atti delle autorità pubbliche.

Esempio di temporanea sospensione dell'applicabilità della norma è quello relativo al caso di indisponibilità all'utenza di parte del sistema di alimentazione a seguito di guasti o per la necessità di eseguire lavori di manutenzione o costruzione (casi in cui è preferibile alimentare il maggior numero possibile di utenti, a costo di un peggioramento delle caratteristiche della tensione, piuttosto che avere una completa interruzione dell'alimentazione).

² Un sistema elettrico è in esercizio normale quando è in grado di soddisfare l'alimentazione del carico, eliminare i guasti e riprendere il servizio con mezzi e procedimenti ordinari, in assenza di condizioni eccezionali dovute ad influenze esterne o a situazioni critiche rilevanti,

Vanno esclusi infine quei casi in cui le apparecchiature o gli impianti degli utenti non siano conformi alle norme ed alle regolamentazioni.

I termini definiti nella norma possono essere però superati in tutto o in parte da regole contrattuali stabilite tra fornitore e Cliente (ad esempio i *Contratti di Qualità*).

In generale la norma contempla le caratteristiche della tensione di alimentazione riguardanti:

- frequenza;
- ampiezza;
- forma d'onda;
- simmetria delle tensioni trifase,

caratteristiche soggette a variazioni durante il normale esercizio di un sistema elettrico a seguito di variazioni del carico, disturbi generati da particolari apparecchiature e dal verificarsi di guasti. Le caratteristiche variano in modo aleatorio sia nel tempo, con riferimento ad uno specifico terminale di consegna, sia nella posizione, con riferimento ad un qualunque istante assegnato. A causa di queste variazioni ci si può aspettare il superamento dei livelli delle caratteristiche in un ridotto numero di casi.

In **TAB.4-1** sono riportate le caratteristiche per cui sono dati dei limiti definiti, limiti indicati con una percentuale del tempo di osservazione.

In **FIG.4-1** sono rappresentate alcune tipologie di disturbi che possono verificarsi sulle reti di distribuzione, che saranno approfonditi negli Allegati A e C.

TAB. 4-1 Caratteristiche della tensione con valori definiti

Caratteristiche della tensione	Conformità ai limiti previsti (cfr. Allegato A)	Periodo di osservazione
Frequenza	100% 95%	Una settimana
Variazioni lente della tensione	95%	Una settimana
Variazioni rapide della tensione	Sono ammesse alcune eccezioni al giorno	Un giorno
Fluttuazioni della tensione (flicker)	95%	Una settimana
Dissimmetria delle tensioni trifase	95%	Una settimana
Distorsione armonica della tensione	95%	Una settimana
Interarmoniche di tensione (*)	Da definire	Da definire
Livelli dei segnali iniettati sulle linee elettriche	99%	Un giorno

(*) I livelli per le interarmoniche sono allo studio, in attesa di maggiore esperienza

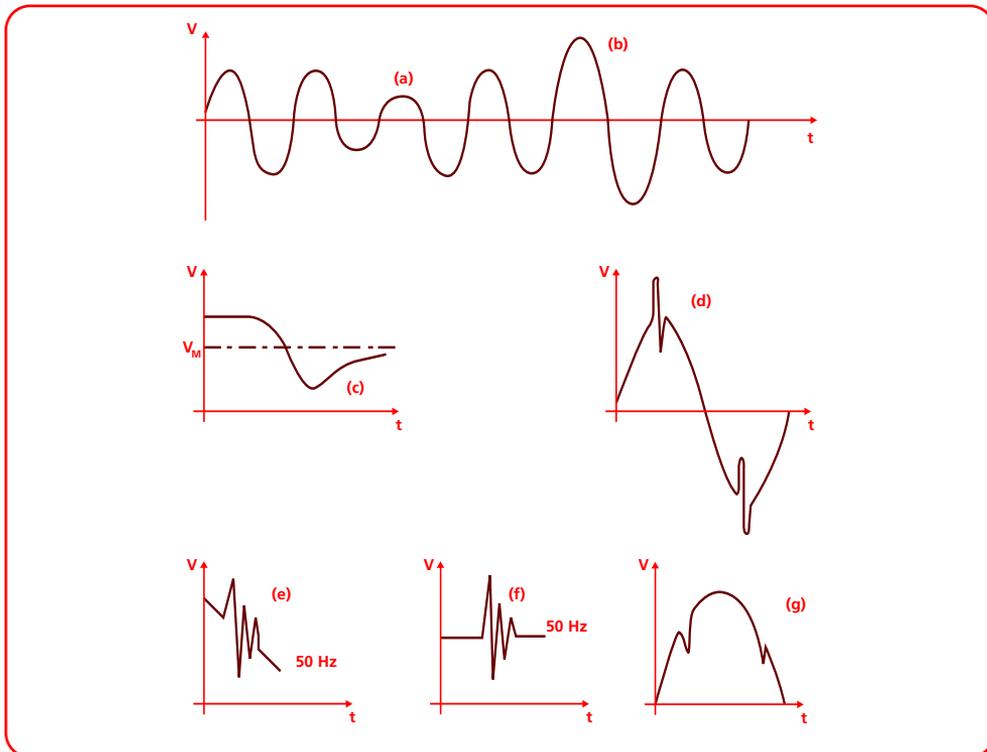


FIG.4-1 Schematizzazione della tipologia di variazione dell'ampiezza della tensione.
 (a) Buchi di tensione; (b) Sovratensioni non impulsive; (c) Variazioni lente; (d) Sovratensioni impulsive di lunga durata; (e) Sovratensioni impulsive di media durata; (f) Sovratensioni impulsive di breve durata; (g) Transitori di commutazione

La norma (cfr. Allegato A), oltre a caratteristiche per le quali è possibile specificare dei valori limite definiti, contempla anche caratteristiche per le quali è possibile dare solo dei valori indicativi. Questo è il caso in cui i fenomeni che incidono su tali caratteristiche prevedono un'estrema imprevedibilità e variabilità, rispetto al luogo ed al tempo, da non permettere altro che stabilire solo dei valori indicativi, per le caratteristiche corrispondenti, con lo scopo di fornire informazioni sull'ordine di grandezza che ci si può attendere.

Le caratteristiche della tensione per le quali sono forniti solo valori indicativi, sono:

- i buchi di tensione;

- le interruzioni brevi e lunghe³;
- le sovratensioni transitorie e temporanee.

Relativamente ai buchi di tensione ed alle interruzioni brevi e lunghe, si ricorda che, mentre la Norma definisce, in merito alla numerosità attesa in un anno degli eventi, valori indicativi variabili tra:

buchi di tensione

- da qualche decina "fino ad un migliaio";

interruzioni brevi

- da qualche decina a parecchie centinaia (la durata di circa il 70% delle interruzioni brevi può essere inferiore a 1 s);

interruzioni lunghe

- lunghe, da meno di 10 o fino a 50, a seconda della zona.

In ambito nazionale, l'Autorità per l'Energia Elettrica ed il Gas (AEEG) ha recentemente introdotto dei livelli specifici di continuità relativamente alle sole interruzioni lunghe per i clienti di "maggiore dimensione" con dichiarazione di adeguatezza degli impianti (cfr. delibera AEEG 247/04), stabilendo i seguenti parametri massimi:

- a) per clienti di maggiore dimensione alimentati in alta tensione: 1 interruzione senza preavviso lunga all'anno salvo che per i clienti AT che, a partire dall'1 gennaio 2005, richiedano la connessione a reti AT in derivazione rigida, per i quali si applica lo standard di 2 interruzioni senza preavviso lunghe all'anno;
- b) per clienti di maggiore dimensione alimentati in Media Tensione e appartenenti ad ambiti territoriali ad alta concentrazione: 3 interruzioni senza preavviso lunghe all'anno;
- c) per clienti di maggiore dimensione alimentati in Media Tensione e appartenenti ad ambiti territoriali a media concentrazione: 4 interruzioni senza preavviso lunghe all'anno;
- d) per clienti di maggiore dimensione alimentati in Media Tensione e appartenenti ad ambiti territoriali a bassa concentrazione: 5 interruzioni senza preavviso lunghe all'anno."

Inoltre, l'AEEG ha avviato una campagna di monitoraggio della qualità del servizio al fine di caratterizzare lo scenario nazionale anche dal punto di vista di altri disturbi della tensione.

³ Come verrà meglio illustrato nell'Appendice A, la **CEI EN 50160** non definisce le interruzioni "transitorie" o microinterruzioni, ovvero quelle interruzioni brevi dell'alimentazione di rete di durata inferiore al secondo e risultanti dall'esecuzione delle procedure di dei cicli di richiusura rapida (apertura/richiusura) dell'interruttore di linea (le durate effettive, tipiche di tali interruzioni, sono pertanto tra i 300 e 500 ms). Si sottolinea che tali disturbi, a cui è associato il completo annullamento della tensione di alimentazione, si differenziano dai buchi di tensione per i quali permane, in ogni caso, una tensione residua che, al minimo, la norma definisce pari all'1% della tensione nominale.

4.1.2 La normativa EMC

L'obiettivo fondamentale del coordinamento EMC è di assicurare che l'emissione di ciascuna sorgente individuale di disturbo sia tale che la combinazione di tutte le emissioni originate da differenti sorgenti non comporti un superamento del livello convenzionalmente accettato di disturbo per l'ambiente elettromagnetico (livello di compatibilità) e che l'immunità dell'apparecchiatura consenta un livello appropriato di prestazione della stessa, in presenza del livello di disturbo convenzionalmente previsto.

Un compito della normativa EMC è quindi quello di stabilire i livelli di compatibilità per i quali poter valutare l'immunità delle apparecchiature, una volta definiti gli ambienti elettromagnetici di riferimento.

Come visto al Cap.3, essenziale per la conformità ai livelli di compatibilità è la definizione dei limiti di emissione dell'installazione con un margine adeguato rispetto ai livelli di compatibilità stessi, considerando anche la somma delle emissioni di tutte le installazioni alimentate dalla stessa rete: un tale approccio, tuttavia, se è possibile, caso per caso, per grandi installazioni MT, non risulterebbe pratico per gli altri utenti MT e, soprattutto, BT. Tale aspetto viene affrontato dalla normativa EMC con le cosiddette "norme di prodotto", che specificano i limiti di emissione per famiglie di apparecchiature, nell'ipotesi generale che, avendo stabilito tali limiti, l'apparecchiatura possa essere utilizzata senza bisogno di ulteriori verifiche di congruenza tra emissione e compatibilità.

4.2 Regole di connessione di Enel Distribuzione

La connessione degli impianti alla rete di distribuzione è un elemento essenziale che influenza, a livello strutturale, la stessa qualità del servizio dell'impianto allacciato. Per questo, unitamente alla normativa tecnica, le problematiche della qualità del servizio, ed in particolare quelle relative all'allacciamento dei carichi industriali, vengono trattate dalle regole di connessione alla rete del Distributore.

Il rispetto delle regole di connessione è condizione necessaria per poter garantire un livello di qualità del servizio commisurato alle esigenze del processo industriale alimentato.

Relativamente alla rete di Enel Distribuzione, tali regole sono:

- **DK 5600** - CRITERI DI ALLACCIAMENTO DI CLIENTI ALLA RETE MT DELLA DISTRIBUZIONE
- **DK 5550** - CRITERI DI ALLACCIAMENTO DI IMPIANTI UTILIZZATORI COMPREDENTI FORNI AD ARCO A CORRENTE ALTERNATA
- **DK 5750** - CRITERI DI ALLACCIAMENTO ALLA RETE MT DI IMPIANTI DI RISALITA DOTATI DI CONVERTITORI CA/CC
- **DK 5740** - CRITERI DI ALLACCIAMENTO DI IMPIANTI DI PRODUZIONE ALLA RETE MT DI ENEL DISTRIBUZIONE

Le prescrizioni riportate nei documenti, oltre a definire i criteri di allacciamento degli impianti, forniscono, tra l'altro, una metodologia di verifica della compatibilità delle installazioni sul sistema elettrico ed indicazioni tecniche al fine di ridurre l'entità dei disturbi provocati dalle installazioni.

Il documento **DK 5550**, dedicato alle problematiche connesse all'alimentazione di forni ad arco, oltre ad analizzare il disturbo di flicker prende in considerazione anche le armoniche conseguenti al funzionamento dei forni e, nel calcolo delle emissioni, anche di eventuali altri carichi non lineari presenti nell'impianto.

4.3 Monitoraggio della qualità della tensione

La creazione di un sistema di monitoraggio della Qualità della Tensione è stata promossa dalla Autorità per l'energia elettrica e il gas al fine di disporre di una base di conoscenza della situazione esistente. Ciò per valutare la possibilità di definire nuove iniziative di regolazione, inclusa l'introduzione di obblighi di misurazione della qualità della tensione in capo alle imprese distributrici, nonché favorire lo sviluppo dei contratti per la qualità introdotti nel Testo integrato della qualità⁴.

Di conseguenza, è stata avviata la realizzazione di due sistemi di monitoraggio, uno per la rete MT ed uno per la rete AT. Entrambi i sistemi hanno degli obiettivi comuni che si possono così sintetizzare:

⁴ Autorità per l'energia elettrica e il gas: "Testo integrato delle disposizioni dell'Autorità in materia di qualità dei servizi di distribuzione, misura e vendita dell'energia elettrica" Delibera 30 gennaio 2004, n. 4/04.

- raccogliere elementi conoscitivi da rendere pubblicamente disponibili sulle attuali performance delle reti MT ed AT in merito ai parametri della qualità della tensione;
- sensibilizzare i clienti sulle opportunità che il Testo integrato della qualità già rende disponibili in materia di qualità della tensione, con particolare riferimento alla misurazione individuale di tali parametri e ai contratti per la qualità;
- introdurre nuovi obblighi di misurazione della qualità della tensione e successivamente valutare l'eventuale introduzione di forme di regolazione economica di alcuni parametri della qualità della tensione.

L'avvio del sistema di monitoraggio è avvenuto attraverso una serie di contatti e incontri ai quali hanno partecipato tutti i soggetti interessati. L'iniziativa è stata infatti avviata ufficialmente il 21 marzo 2005 in un incontro organizzato dall'Autorità per l'energia elettrica e il gas con i rappresentanti dei Distributori, di TERNA e delle associazioni dei clienti (Confindustria, Confartigianato e CONFAPI). In questo incontro è stata infatti presentata e discussa una bozza del documento per la consultazione⁵, nel quale si illustrano le scelte operate sugli indicatori della qualità, sulla scelta dei punti di rilevazione e sulla durata della campagna di monitoraggio.

Enel Distribuzione ha partecipato attivamente alla realizzazione del sistema di monitoraggio sia contribuendo alla selezione dei punti più rappresentativi dove installare gli strumenti di misura, sia installandoli presso le proprie Cabine Primarie e lungo le linee MT.

Alla realizzazione del sistema di monitoraggio hanno partecipato anche alcuni Clienti, che si sono potuti avvantaggiare delle economie di scala per l'acquisto degli strumenti di rilevazione e che potranno disporre dei dati di qualità della tensione rilevati sul proprio punto di consegna.

4.3.1 Caratteristiche del sistema di monitoraggio

Il sistema effettua il monitoraggio dei seguenti parametri della qualità della tensione:

⁵ Autorità per l'energia elettrica e il gas: "Iniziativa per il monitoraggio della qualità della tensione sulle reti di distribuzione dell'energia elettrica". Documento di consultazione 6/4/2005.

- ampiezza e variazioni della tensione di alimentazione (variazioni lente a frequenze prossime a 50 Hz),
- interruzioni della tensione di alimentazione (interruzioni transitorie, brevi e lunghe),
- buchi di tensione,
- armoniche,
- flicker,
- squilibrio della tensione,
- variazioni rapide della tensione,

ed è funzionalmente analogo per la rete AT e per la rete MT. La differenza tra i due sistemi consiste invece nel finanziamento (sostanzialmente a carico della Ricerca di Sistema per la rete MT) e nella gestione dei dati (a carico della Società CESI per la rete MT, mentre è a carico di TERNA e dei Distributori interessati per la rete AT).

Dal momento che le reti si caratterizzano per un numero elevato di parametri tecnici, la selezione dei punti sui quali installare gli strumenti ha tenuto conto delle loro principali caratteristiche. In particolare, per le

- reti AT: della potenza di cortocircuito, della potenza del trasformatore AAT/AT in modo da coprire in modo omogeneo tutte le taglie attualmente installate, della tipologia della rete sottesa alla Stazione (urbana, extraurbana, rurale, industriale, montana, ecc.), della tipologia di carichi e/o delle produzioni;
- reti MT: della potenza del trasformatore AT/MT, dello stato del neutro (isolato o compensato), del tipo di automazione per la selezione automatica dei tronchi guasti, della tipologia prevalente degli Ambiti territoriali alimentati (alta, media, bassa concentrazione di utenti BT), della tipologia prevalente delle linee MT (aeree, miste o in cavo), della presenza di carichi disturbanti, della presenza di generazione distribuita, del numero di utenti MT.

Le suddette caratteristiche sono state pesate opportunamente in modo da realizzare una copertura statisticamente significativa della rete AT e di quella MT. Il processo ha portato quindi alla installazione

- per le reti AT, di circa 150 strumenti di cui circa 103 su stazioni TERNA, 45 sulle Cabine Primarie di Enel Distribuzione, qualche Cliente AT ha aderito alla campagna di monitoraggio;
- per le reti MT, di circa 350 strumenti sulle sbarre MT delle Cabine Primarie di Enel Distribuzione. 68 Clienti MT hanno aderito alla campagna di monitoraggio;

- 
- Enel Distribuzione installerà circa 100 apparecchiature di misura lungo le proprie linee MT al fine di poter analizzare la propagazione dei disturbi nella rete MT usufruendo di circa 100 punti di misura riservati a clienti MT e non utilizzati.

La durata del monitoraggio è stata prevista di almeno due anni in modo da avere una base statisticamente significativa di dati.

5. TIPI DI APPARECCHI

Una classificazione degli apparecchi disturbanti può essere fatta in modi diversi (tipologia dell'applicazione, potenza, livello di tensione della rete di alimentazione) e, dal punto di vista dei disturbi, dovrebbe considerare che uno stesso tipo di apparecchio può dare luogo contemporaneamente a più tipi di disturbi. Allo stesso modo uno stesso provvedimento presso la rete dell'utente può servire a contenere i livelli di emissione di più disturbi.

Con riferimento a disturbi quali le armoniche, le fluttuazioni di tensione/flicker e lo squilibrio, nella TAB.5-1 è riportata una classificazione generale delle principali tipologie di apparecchi disturbanti. L'entità del disturbo in rete è funzione sia dello scambio di potenza attiva e reattiva dell'apparecchiatura con la rete, sia della potenza di corto circuito della rete stessa al PAC.

TAB. 5-1 Tipologia apparecchi disturbanti

Tipologia di apparecchio disturbante	Disturbo
Armoniche	Apparecchiature con convertitori statici ed in generale con componenti elettronici di potenza. Carichi con comportamento non lineare (saldatrici, forni, trasformatori durante l'energizzazione, ecc.)
Variazioni rapide di tensione - Flicker	Apparecchiature con variazioni delle potenze attive e reattive scambiate con la rete (saldatrici, forni, motori, ecc.)
Squilibrio	Tutti i carichi monofase. Carichi con funzionamento non equilibrato sulle tre fasi

5.1 Criteri per la valutazione dei livelli di emissione

I livelli di emissione per i vari disturbi si determinano nel modo seguente:

- si calcola il livello di emissione dei singoli apparecchi
- si valuta il livello di emissione (totale) dell'utente, come composizione dei livelli di emissione dei singoli apparecchi
- si confronta il livello di emissione totale dell'utente con il limite di emissione consentito; questo limite di emissione è generalmente definito dal Distributore sulla base di criteri atti ad assicurare il controllo dei livelli di compatibilità, come indicato in Cap. 3.



La valutazione dei livelli di emissione è generalmente effettuata nei "punti di comune accoppiamento" ritenuti di particolare interesse: punto di comune accoppiamento con la rete pubblica (PAC) e punti di comune accoppiamento interni alla rete di distribuzione dell'utenza (PAI).

5.1.1 Flicker

Il fenomeno del flicker è dovuto a fluttuazioni di tensione (variazioni rapide e ripetitive di tensione) che possono presentare diverse forme d'onda delle quali alcune sono stilizzate in FIG.5-1.

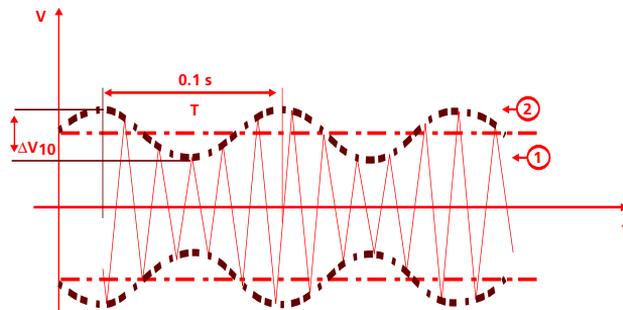
In sede internazionale si è posto il problema di misurare il flicker in modo oggettivo, attraverso uno strumento che, collegato a una rete soggetta a fluttuazioni di tensione, indichi il livello della sensazione visiva che il soggetto umano avvertirebbe, se una lampada di riferimento (230 V, 60 W) fosse alimentata dalla rete in questione.

Questo strumento, detto "flickermetro", è stato messo a punto dall'Unione Internazionale di Elettrotecnica (UIE) e le sue specifiche sono oggetto della Norma **CEI EN 61000-4-15**⁶ e sua Variante.

La misura del flicker, effettuata dallo strumento, è espressa attraverso gli indici di disturbo Pst e Plt.

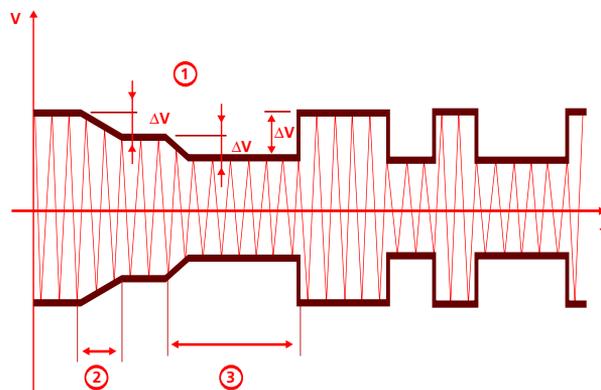
⁶ **CEI EN 61000-4-15**: Compatibilità elettromagnetica (EMC) Parte 4: Tecniche di prova e di misura Sezione 15: Flickermetro - Specifiche funzionali e di progetto.

a) Fluttuazione di tensione di tipo sinusoidale a frequenza di 10Hz



- 1 Tensione istantanea (frequenza di rete: 50Hz)
- 2 Fluttuazione sinusoidale di tensione di ampiezza ΔV_{10}

b) Fluttuazione di tensione di tipo a rampa e rettangolare



- 1 Variazione di tensione di ampiezza ΔV
- 2 Durata delle variazioni di tensione
- 3 Intervallo di variazioni di tensione

FIG.5-1 | Esempi di fluttuazione di tensione

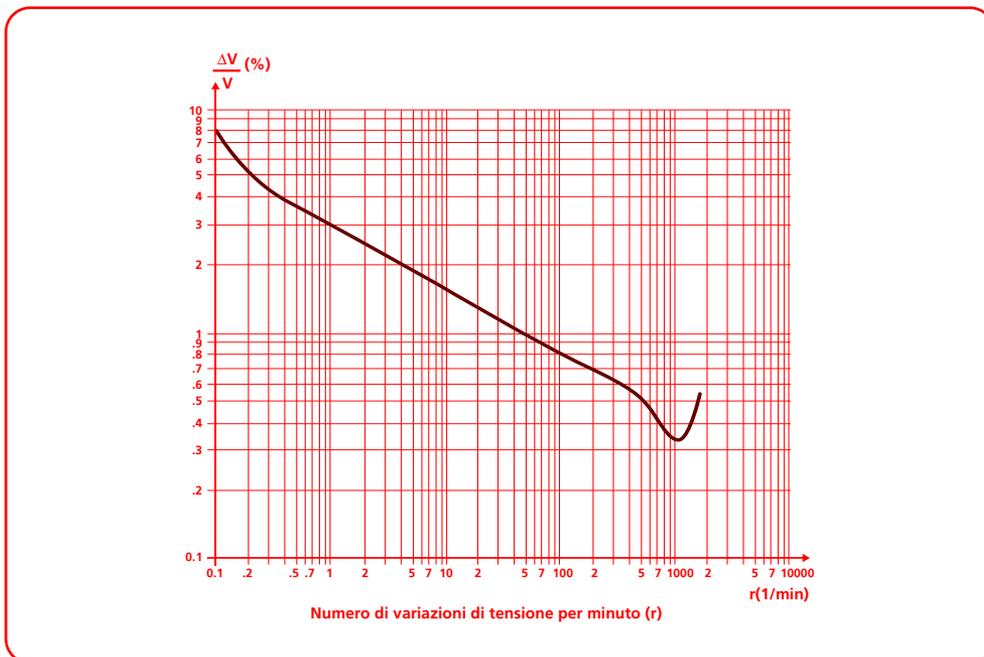


FIG. 5-2 | Curva per $P_{st} = 1$ per variazioni di tensione rettangolari equidistanti

Una relazione di base tra la variazione di tensione e la conseguente severità di flicker è data dalla curva $P_{st}=1$ (FIG.5-2) tratta dal documento IEC/TR 61000-3-7⁷. Tale curva è valida per variazioni di tensione rettangolari equidistanti e ripetitive e indica la variazione percentuale di tensione che a una certa frequenza di ripetizione dà un $P_{st}=1$.

5.1.2 Armoniche

La distorsione armonica della tensione in un punto della rete elettrica è principalmente la conseguenza delle cadute di tensione prodotte dalle armoniche di corrente nel percorrere le impedenze della rete.

⁷ IEC/TR 61000-3-7: "Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 3: Limits – Section 7: Assessment of emission limits for fluctuating loads in MV and HV power systems"

Le armoniche di corrente sono prodotte soprattutto da carichi non lineari e in misura molto ridotta da elementi non lineari della rete stessa.

Lo spettro delle armoniche di corrente di un carico distorcente presenta frequenze e ampiezze che dipendono dalle caratteristiche del carico; in particolare l'ampiezza delle armoniche è all'incirca inversamente proporzionale al rango armonico.

I meccanismi di diffusione delle armoniche di corrente, nell'ambito di un medesimo livello di tensione e fra livelli diversi, dipendono dalle caratteristiche elettriche e strutturali del sistema in esame.

Occorre ricordare il problema delle risonanze, che possono amplificare la distorsione relativa a un'armonica, di un fattore normalmente pari a circa 3-5 volte per le reti pubbliche e che può raggiungere valori di circa 8-10 volte per le reti industriali, specie nel caso di reti con basso carico o carico prevalentemente motore (carico induttivo)⁸.

L'ordine dell'armonica per la quale si può avere la risonanza, dipende molto dalla presenza e relativa potenza di batterie di condensatori; inoltre il fattore di amplificazione viene notevolmente attenuato dalla presenza del carico, per cui il tasso di distorsione può essere sensibilmente variabile nel tempo.

Un aspetto importante è la modalità di composizione dei contributi provenienti dalle diverse sorgenti di disturbo esistenti in una rete, considerando anche che, allo sfasamento intrinseco delle correnti armoniche all'atto della loro generazione, si aggiunge quello dovuto alle impedenze delle linee.

La valutazione della distorsione armonica della tensione effettuata anche in modo approssimato risulta alquanto complessa e generalmente richiede il ricorso a programmi di calcolo.

5.2 Provvedimenti per limitare le emissioni

L'obiettivo del contenimento dei disturbi sugli impianti utilizzatori è essenzialmente quello di adottare tutti i possibili provvedimenti per limitare al massimo gli effetti negativi delle perturbazioni per l'utenza.

Si osserva innanzitutto come uno stesso provvedimento presso la rete dell'utente può servire a contenere l'effetto di più disturbi, valutando anche la convenienza tecnico-economica di adottarlo a livello globale o di singola apparecchiatura.

⁸ IEC/TR 61000-3-6: "Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 3:Limits – Section 6: Assessment of emission limits for distorting loads in MV and HV power systems"

I principali provvedimenti che possono essere adottati per contenere l'emissione dei disturbi sono sintetizzati in **TAB.5-2**. I provvedimenti finalizzati ad attenuare la propagazione dei disturbi stessi sono sintetizzati in **TAB.5-3**. Le sintesi suddette si limitano ai rimedi più generali e danno una visione d'insieme.

Nel seguito del presente capitolo vengono date, inoltre, informazioni atte a limitare l'emissione dei principali disturbi condotti quali fluttuazioni di tensione, flicker, armoniche e squilibri.

Informazioni di dettaglio relative all'attenuazione della propagazione dei disturbi sono invece fornite nel Cap.6, relativo agli Apparecchi Sensibili.

TAB. 5-2 Tipi di interventi possibili sull'impianto dell'utente, per contenere l'emissione dei disturbi

Tutti i disturbi condotti

- scelta del punto di allacciamento con maggiore potenza di cortocircuito e/o passaggio a un livello di tensione superiore

Squilibri

- ripartizione carico monofase in modo equilibrato tra fasi
- equilibratura carico monofase con reattanze
- adozione apparecchi trifase per potenze elevate

Interruzioni

- coordinamento protezioni della rete elettrica dell'utente con quelle della rete del Distributore
- manutenzione programmata impianto

Buchi di tensione e interruzioni brevi

- tecniche per il contenimento delle correnti di inserzione:
 - > avviamento motori a tensione ridotta: con commutazione stella/ triangolo, con resistenze/induttanze statoriche, con autotrasformatore
 - > energizzazione alimentatori, condensatori, trasformatori
- chiusura programmata dei teleruttori
- commutazione dei carichi (rapida, lenta)

Armoniche

- raddrizzatori: adozione di sistemi con alto numero di impulsi, scelta appropriata degli schemi di connessione dei trasformatori (es. dodecafase al posto di esafase)
- eliminazione di condizione di risonanza (assetto di alimentazione opportuni, variazioni della potenza dei condensatori di rifasamento)
- filtri passivi

Variazioni di tensione e flicker

- compensatori statici di reattivo (SVC): reattori parzializzati a tiristori, reattori a saturazione naturale, condensatori controllati a tiristori
- avviamento motori a tensione ridotta: con commutazione stella/triangolo, con resistenze/induttanze statoriche, con autotrasformatore/trasformatore incorporato

TAB. 5-3 Tipi di interventi possibili sull'impianto dell'utente per attenuare la propagazione dei disturbi

Buchi di tensione, interruzioni brevi e altri disturbi condotti

- gruppi di continuità

Sovratensioni di manovra

- scaricatori, filtri passivi (RC)

Disturbi irradiati e differenze di potenziale di terra

- criteri adeguati di posa dei collegamenti dei sistemi disturbanti
- schermature
- adeguata messa a terra
- separazione galvanica

5.2.1 Limitazione delle variazioni rapide di tensione di origine interna all'impianto utilizzatore

Per quanto riguarda le variazioni di tensione, esse sono generalmente provocate da avviamenti di motori e quindi risolvibili con metodi di limitazione delle correnti di spunto e con una accurata ripartizione dei circuiti di alimentazione dei carichi, all'interno dell'impianto.

I metodi più usati per ridurre le correnti di spunto dei motori asincroni (a gabbia e a rotore avvolto) mediante elementi ausiliari esterni sono i seguenti:

- *avviamento stella-triangolo*: è il più semplice metodo di avviamento ad assorbimento ridotto, consente una diminuzione della corrente di spunto di un fattore di circa 3 volte ed è applicabile a motori con potenza fino a 500 kW; la coppia di avviamento è un terzo di quella in connessione a triangolo e la commutazione a questo schema di funzionamento avviene quando lo scorrimento è inferiore al 20%;
- *avviamento con resistenze statoriche singole, a gradini o a variazione continua (elettrolitiche)*: le resistenze limitano la tensione di alimentazione del motore nella fase di avviamento e la coppia di spunto è anch'essa ridotta in proporzione al quadrato della tensione; questo metodo è essenzialmente utilizzato per motori BT;
- *avviamento stella-triangolo con resistenze statoriche*: rappresenta l'associazione dei due metodi precedenti e procede in tre fasi:
 - avviamento a stella
 - commutazione su triangolo con resistenze
 - commutazione su triangolo;
- *avviamento con induttanze statoriche*: è analogo a quello con resistenze salvo l'impiego delle induttanze al posto di queste; trova impiego nei motori MT;

- *avviamento con autotrasformatore*: il motore è avviato alimentandolo da un autotrasformatore che gli fornisce una tensione ridotta, si apre quindi il neutro dell'autotrasformatore e successivamente lo si cortocircuita, in modo da evitare transitori di commutazione nel passaggio da tensione ridotta a tensione piena.

Per i motori asincroni a rotore avvolto, oltre a quanto sopra detto, i resistori esterni inseriti sul circuito rotorico per il controllo della coppia in avviamento determinano una drastica riduzione della corrente di avviamento.

I motori sincroni a velocità fissa sono ormai sempre avviati come asincroni e la corrente di spunto può essere ridotta con induttanze statoriche, trasformatore o autotrasformatore, come per gli asincroni.

5.2.2 *Compensazione del flicker*

Come detto in precedenza, il flicker è originato da fluttuazioni di tensione, causate essenzialmente da assorbimenti variabili di potenza reattiva.

La riduzione del flicker emesso sulla rete pubblica e su quella interna dell'impianto utilizzatore richiede quindi che tali variazioni vengano attenuate o sopresse mediante sistemi nei quali, attraverso un anello di regolazione, venga effettuata, per ogni variazione prodotta dal carico fluttuante, una variazione di segno opposto con tempi di risposta molto brevi.

Un compensatore deve inoltre assicurare il mantenimento di un $\cos\phi$ medio corrispondente all'ottimo funzionale del carico anche con riferimento alle clausole di fornitura.

La tecnica dei compensatori, abbandonati i generatori sincroni funzionanti in sovraeccitazione, è attualmente basata sui seguenti tipi di soluzione:

- reattori saturabili con controllo in corrente continua
- reattori a saturazione diretta in corrente alternata
- compensatori a induttanza lineare con controllo a tiristori
- compensatori a commutazione di condensatori comandata a tiristori compensatori a controllo misto induttanza-capacità.

Con l'eccezione del sistema a commutazione di condensatori, tutti gli altri tipi di compensatori generano armoniche e quindi richiedono banchi di filtri come parte dell'impianto.

D'altra parte il sistema a condensatori presenta una caratteristica di regolazione non continua, ma a gradini, e quindi non consente un perfetto inseguimento delle variazioni del carico.

A parte la riduzione dei costi di allacciamento alla rete pubblica, la compensazione del flicker

offre all'utente il vantaggio di ottenere una tensione mediamente più elevata, con sensibile guadagno di potenza disponibile e quindi di produttività. Ad esempio il miglioramento della tensione del 3% implica un aumento della potenza disponibile di circa il 6%.

5.2.3 Limitazione delle armoniche

La limitazione dell'emissione di armoniche sulla rete può essere effettuata con azioni di tipo preventivo o con provvedimenti di tipo correttivo.

Le azioni preventive sono attuabili a livello di progetto dell'installazione scegliendo opportunamente gli apparecchi.

Il caso più frequente è la scelta della tipologia di sistemi raddrizzatori o convertitori a ponti controllati di media e alta potenza (da 500 kW a decine di MW).

In prima approssimazione l'ampiezza delle correnti armoniche generate da tali ponti controllati varia in proporzione inversa al rango, per cui vanno preferiti sistemi ad alto numero di impulsi, che producano armoniche con rango il più possibile elevato. In relazione quindi ai gradi di libertà offerti dai vincoli di funzionamento e di economicità caratteristici di ogni impianto, è opportuno considerare ponti dodecafase anziché esafase (FIG.5-3).

Ad esempio, si ricorda che un ponte raddrizzatore esafase genera tutte le armoniche di rango $6n \pm 1$ ($n = 1,2,3 \dots$) e in particolare le armoniche 5a e 7a, che sono le più temibili dal punto di vista della capacità di diffusione sulla rete. Invece un ponte dodecafase genera armoniche di rango più elevato ($12n \pm 1$) e quindi meno critiche e più facilmente filtrabili.

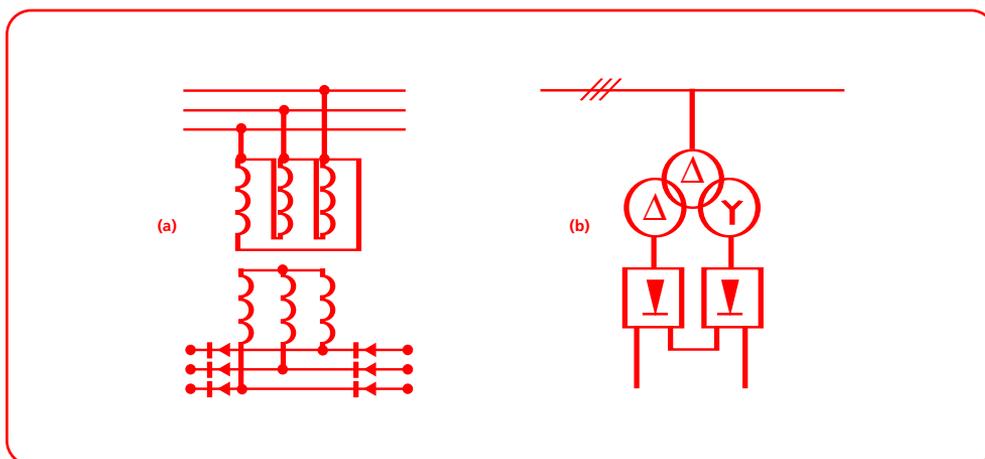


FIG. 5-3 | Ponti raddrizzatori: (a) esafase, (b) dodecafase

Inoltre nei casi in cui esistono convertitori multipli, con uguali caratteristiche, i gruppi di accoppiamento dei diversi trasformatori debbono essere scelti in modo da realizzare uno sfasamento delle armoniche generate da ogni gruppo, realizzando così una parziale cancellazione.

Oltre alle valutazioni relative al dispositivo di conversione, occorre porre attenzione a provvedimenti correttivi atti a ridurre l'emissione delle armoniche sulla rete.

Tali provvedimenti, oltre ovviamente a interventi sulla rete di alimentazione atti ad aumentare la potenza di cortocircuito, consistono essenzialmente nella installazione di filtri passivi risonanti connessi in derivazione nell'impianto utilizzatore per creare "vie a bassa impedenza" e quindi assorbimenti selettivi delle armoniche prodotte nell'impianto stesso.

Nella tipologia più semplice tali filtri possono essere realizzati in configurazione risonante, in cui un condensatore ed un induttore, connessi in serie (FIG.5-4), realizzano una risonanza ad una frequenza di accordo pari a:

$$f_r = \frac{1}{2 \cdot \sqrt{L \cdot C}}$$

normalmente corrispondente alla frequenza dell'armonica da filtrare (in corrispondenza della risonanza il filtro presenta un'impedenza minima pari alla resistenza propria dell'induttore). Alla frequenza fondamentale di rete, un filtro risonante presenta un comportamento capacitivo, generando una potenza reattiva rifasante (QC), funzione dell'ordine armonico di accordo (n) e del valore di capacità (C) del filtro:

$$Q_c = \frac{n^2}{n^2 - 1} \cdot U_1^2 \cdot C \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_1$$

dove:

f₁: frequenza fondamentale di rete (50 Hz);

U₁: tensione di alimentazione del filtro (componente fondamentale).

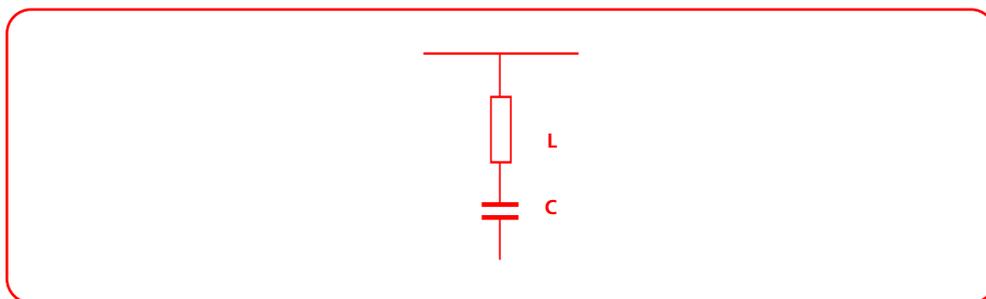


FIG. 5-4 Schema di un filtro risonante serie

Configurazioni più complesse di filtro possono essere realizzate specie per la compensazione di armoniche di ordine elevato (tipicamente a partire dall'11a armonica). Il progetto dei filtri è molto delicato e deve tener conto di tutte le possibili configurazioni della rete di alimentazione e della circolazione su questa rete di armoniche prodotte da altre fonti, in modo da dimensionare correttamente gli elementi filtranti e i condensatori per il rifasamento.

È opportuno, inoltre, ricordare il problema della protezione delle batterie di condensatori da sovraccarichi dovuti alle correnti armoniche. Un rimedio di carattere generale è costituito dall'inserimento in serie alla batteria o a gruppi di condensatori di un reattore induttivo, calcolato in modo da soddisfare il più adatto dei criteri appresso elencati:

- **circuito di sbarramento:** in questo caso il valore dell'induttanza è calcolato in modo che risulti $L > 2 / (h^2 \cdot \omega^2 \cdot C)$, essendo h il rango dell'armonica considerata; in questo modo si aumenta l'impedenza del circuito serie reattore-condensatore riducendo l'intensità delle correnti armoniche circolanti;
- **circuito di disaccoppiamento:** in questo caso la funzione dell'induttanza è di spostare la frequenza di risonanza del banco di condensatori con la reattanza induttiva equivalente della rete, verso una frequenza lontana da quelle di eventuali armoniche iniettate; deve allora risultare $L > 1 / (h^2 \cdot \omega^2 \cdot C)$, dove h è il rango dell'armonica che può dar luogo a risonanza tra condensatori e rete, in modo che a tale frequenza l'impedenza del ramo risulti induttiva.

Ovviamente il rimedio di cui sopra va adattato alle esigenze del caso in esame, evitando di introdurre nuove situazioni di risonanze in corrispondenza di armoniche o frequenze spurie significative.

6. APPARECCHI E PROCESSI SENSIBILI

6.1 Tipi di apparecchi sensibili

Tutti gli apparecchi utilizzatori risultano sempre, in misura differenziata, sensibili alle irregolarità o disturbi dell'alimentazione. Gli apparecchi sono a loro volta più o meno integrati nell'ambito di specifici processi industriali, la cui sensibilità dipenderà dal ruolo/grado di integrazione dell'apparecchio sensibile all'interno del processo stesso e dalle conseguenze effettive su questo ultimo del disturbo di rete (specifiche del processo in esame).

Nella **TAB.6-1** sono sintetizzati, a titolo di esempio, gli apparecchi più sensibili ai vari fenomeni, con riferimento anche alle tipologie di variazioni di tensione indicate in **FIG.A-1** dell'Appendice A.

TAB. 6-1 Apparecchi sensibili

Apparecchio sensibile	Fenomeno considerato	Conseguenze
Apparecchi elettronici digitali di controllo di processo o macchinari calcolatori in genere. Azionamenti a velocità variabile (elettronica di potenza).	(a1) Buchi di tensione: $\Delta V \geq 30 \% V_N$ $\Delta t \leq 60 \div 100$ ms	Arresti e/o anomalie dei processi/macchinari. Interventi delle protezioni dell'elettronica di potenza.
In aggiunta a quanto sopra caduta dei dispositivi elettromeccanici (relè ausiliari teleruttori...).	(a2) Buchi di tensione: $\Delta V \geq 30 \% V_N$ $\Delta t > 60 \div 100$ ms	Arresto quasi globale di tutte le utenze.
Motori e macchine elettriche. Bobine di contattori. Lampade a incandescenza.	(b) Sovratensioni non impulsive (lunga durata)	Riduzione di vita degli isolamenti.
Impianti di illuminazione. Gli stessi apparecchi di (a1) e (b).	Variazioni lente di tensione: $\Delta V = \pm 10 \% V_N$	In caso di riduzione, rallentamento o arresto di motori elettrici. Le stesse conseguenze di (a1) e (b).
Componenti elettronici sia di controllo che di potenza. Motori, cavi e macchinario elettrico in genere.	Sovratensioni impulsive	Perforazione isolamenti. Danneggiamenti ai circuiti elettronici.
Linee di trasmissione dati e segnali a basso livello di potenza. Apparecchi elettronici di controllo.	Transitori di commutazione (ponti convertitori, tecniche chopper)	Malfunzionamento dei sistemi di controllo e di elaborazione dati
Condensatori. Relè di protezione. Collegamenti a basso livello di potenza. Motori e macchine rotanti. Trasformatori. Cavi elettrici.	Armoniche	Sovriscaldamento e danneggiamento condensatori. Interventi intempestivi relè di protezione. Malfunzionamento sistemi di controllo e di trasmissione dati. Incremento delle perdite di motori, trasformatori, cavi e conseguente sovriscaldamento.
Motori elettrici e macchine rotanti in generale.	Dissimetrie e squilibri	Sovriscaldamento.

Con riferimento ai buchi di tensione e le interruzioni brevi, a titolo di esempio, nelle **FIG.6-1** e **FIG.6-2** sono riportate per alcune apparecchiature curve sperimentali di sensibilità (curve di suscettibilità) che individuano, nel piano definito dal valore percentuale della tensione residua di alimentazione $V\%$ (o dell'ampiezza percentuale $\Delta V\%$ del buco di tensione) e dalla durata Δt dell'abbassamento di tensione, coppie di valori $V\%$ ($\Delta V\%$) e Δt per le quali è garantito o meno il funzionamento dell'apparecchiatura.

In particolare, le curve sono riferite a personal computers (PC), ad apparecchiature di controllo (quali i controllori a logica programmabile, PLC, i controllori di processo e tutta l'elettronica con microprocessori dedicata alla gestione di fasi lavorative nell'ambito di processi industriali), agli azionamenti a velocità variabile (dispositivi basati sull'elettronica di potenza per la regolazione della velocità sia di motori in corrente continua che in alternata) ed ai sensori di misura e processo (tra cui possono essere considerati i relé, i teleruttori ed in generale i trasduttori).

Dall'analisi delle figure si evidenzia come le apparecchiature non abbiano, in generale, un comportamento uniforme a fronte dei disturbi. Tali diversità dipendono da vari fattori legati ai componenti che costituiscono l'apparecchiatura stessa e, per quanto riguarda le apparecchiature di controllo ed i PC, principalmente all'alimentatore su cui si ha l'impatto delle perturbazioni. Nel caso degli azionamenti, il disturbo influenza sia la parte di controllo sia quella di potenza, che però sono caratterizzate da livelli di suscettibilità nettamente diversi, con una minore sensibilità, in generale, dell'apparecchiatura di potenza.

Le curve di sensibilità, oltre ad essere poste a confronto tra loro, evidenziando la diversità di sensibilità tra apparecchiature in linea di principio simili, vengono confrontate con la curva "CBEMA" o "ITIC"⁹ (**FIG.6-3**), curva standard assunta normalmente come riferimento e definita dalla Information Technology Industry Council per carichi che possono essere considerati tra i più critici in termini di sensibilità ai disturbi di rete. Altra curva di sensibilità definita da costruttori è la SEMI (Semiconductor Equipment and Materials International) (**FIG.6-4**) relativa alle apparecchiature a semiconduttore.

È possibile inoltre definire grafici di coordinamento (**IEEE Standard 1346**) sovrapponendo curve di sensibilità per apparecchiature/componenti e curve che delimitano aree caratterizzate da un numero annuo di eventi attesi nella rete di distribuzione pubblica (**FIG.6-5**): nel caso di componenti facenti parte di un unico processo, quello con il "ginocchio" della curva di sensibilità posto più in alto a sinistra definirà la sensibilità del processo.

⁹ La curva "ITIC" rappresenta la revisione della curva "CBEMA" definita dalla Computer Business Equipment Manufacture Association oggi Information Technology Industry Council.

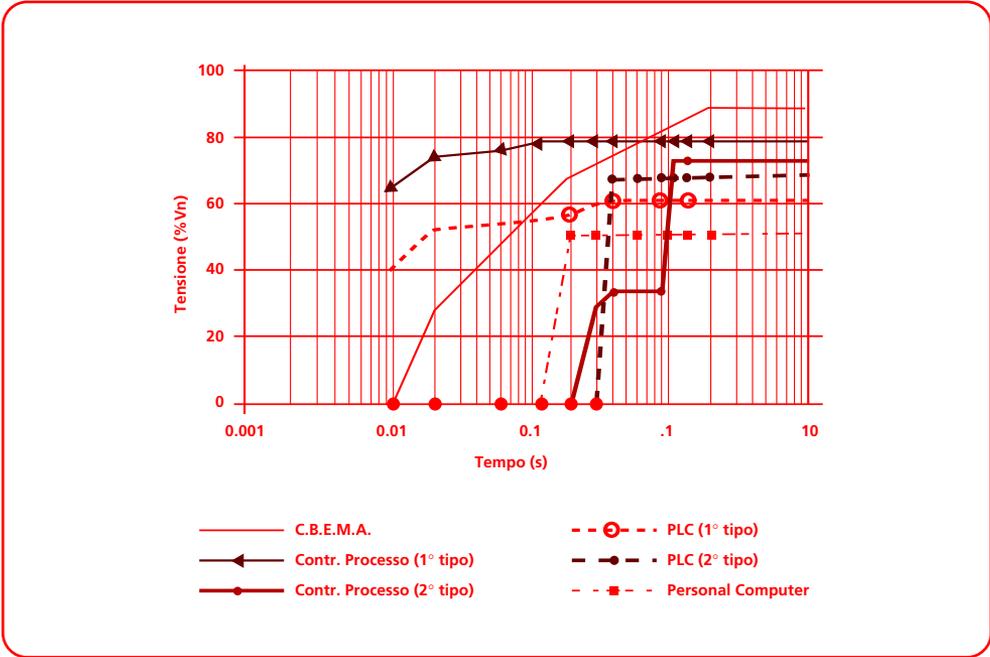


FIG. 6-1 Curve di suscettibilità per PC e apparecchiature di controllo (PLC e Controllori di processo)

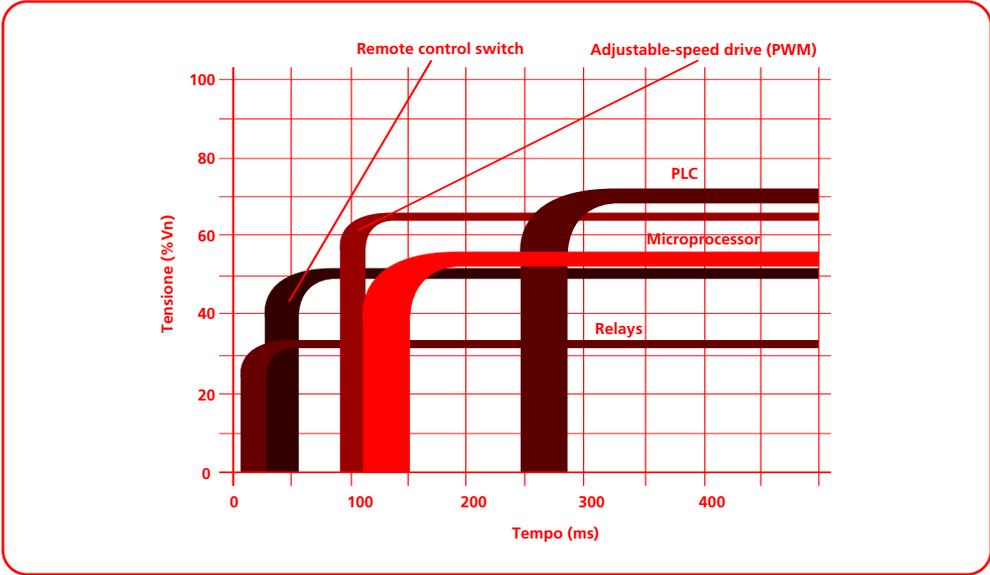


FIG. 6-2 Curve di suscettibilità per PLC, relè, microprocessori ed azionamenti a velocità variabile

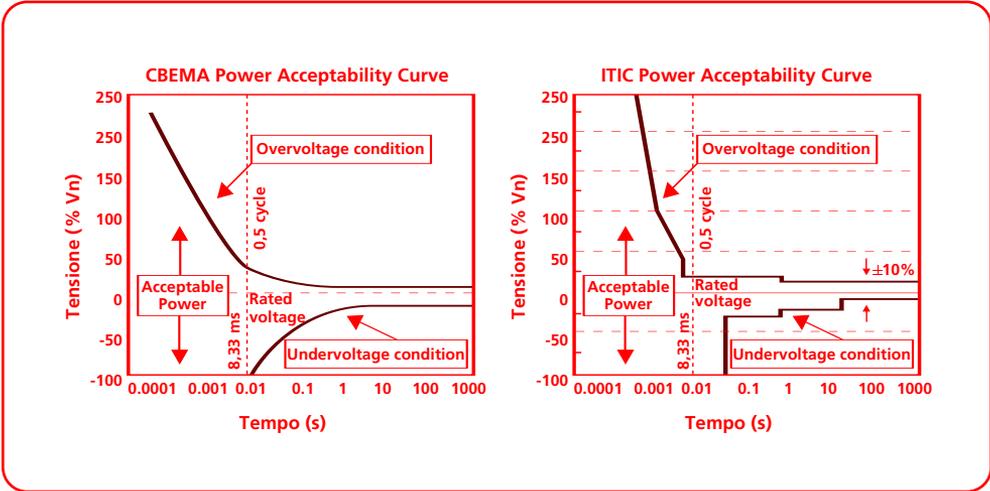


FIG. 6-3 | Curva CBEMA (Computer Business Equipment Manufacture Association) e ITIC (Information Technology Industry Council)

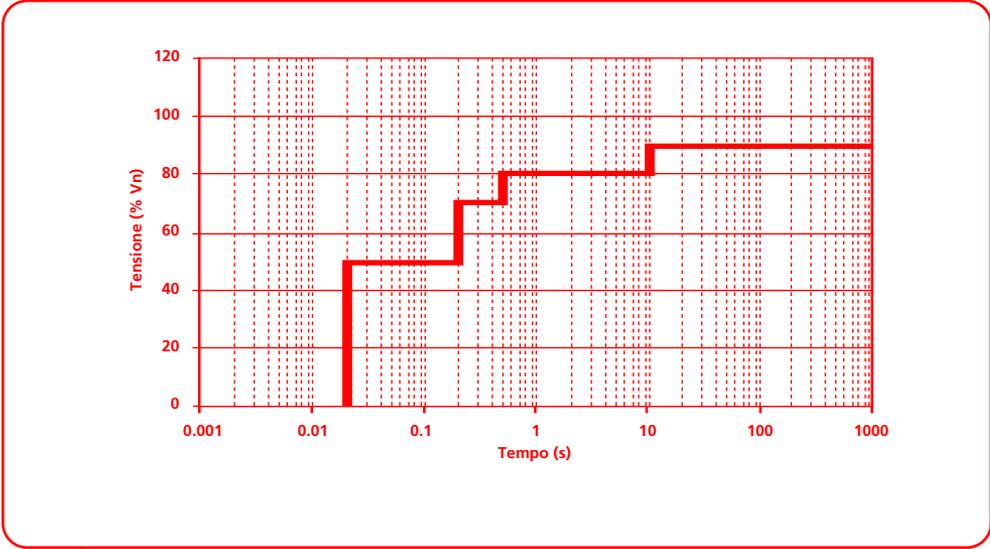


FIG. 6-4 | Curva SEMI (Semiconductor Equipment and Materials International)

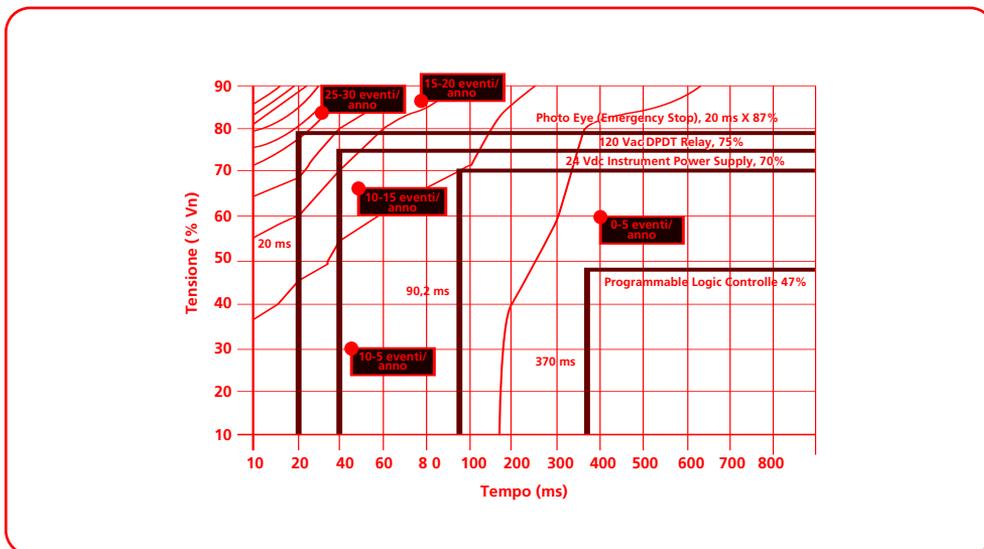


FIG. 6-5 | Grafici di coordinamento previsti dallo Standard IEEE 1346

6.2 Provvedimenti per contenere gli effetti dei disturbi

Il contenimento degli effetti dei disturbi, dovuti alle emissioni interne ed esterne all'impianto industriale, può essere ottenuto operando sia sulle singole apparecchiature, adottando più elevati livelli di immunità, sia sull'impianto, attenuando la propagazione dei disturbi stessi.

Per quanto riguarda il primo aspetto si rimanda a quanto riportato nel **Cap.8**.

Per quanto riguarda il secondo aspetto, con riferimento ai disturbi riportati in **TAB.6-1**, nel seguito si elencano i principali provvedimenti per attenuarne la propagazione. Le indicazioni fornite si riferiscono ad accorgimenti di provata efficacia la cui adozione va comunque valutata caso per caso, in relazione alle diverse situazioni contingenti considerando il rapporto costi-benefici e l'effettivo impatto del disturbo sul processo industriale in cui sono integrate le apparecchiature sensibili.

Nel **Cap.9** verranno presentate le principali caratteristiche di apparecchiature da installare negli impianti per la limitazione dei disturbi e dei loro effetti sia sui carichi sensibili sia sulla rete di alimentazione.

Buchi di tensione di durata ≤ 100 ms

È opportuno che l'alimentazione dei sistemi elettronici di controllo ed elaborazione dati sia effettuata mediante gruppi di continuità.

In alcuni casi, stabilimenti esistenti di media-grande dimensione, l'applicazione estesa di tale concetto può comportare costi notevolissimi.

Una soluzione alternativa, seppure di minore efficacia, consiste nella realizzazione di linee privilegiate per l'alimentazione di tali apparati; essa risulta tanto più efficace, nei confronti del fenomeno descritto, in relazione alle caratteristiche degli alimentatori incorporati in tali apparecchi.

Per i calcolatori risulta invece indispensabile l'alimentazione da gruppo di continuità.

Buchi di tensione di durata > 100 ms

Per fenomeni di durata compresa tra 100 e 300 ms è possibile, adottando i provvedimenti di cui al punto precedente per i sistemi elettronici e alimentando le bobine dei contattori delle utenze essenziali tramite gruppi di continuità, limitare le conseguenze per quanto attiene alla continuità dei processi produttivi.

Poiché quest'ultimo provvedimento non è applicabile, sia per motivi economici che tecnici, alla totalità degli utilizzatori, esso andrà valutato con l'obiettivo di limitare, per quanto possibile, le conseguenze sul processo produttivo comunque presenti.

In molti casi, un intervento efficace per contenere gli effetti dei buchi di tensione è rappresentato da una opportuna temporizzazione delle bobine dei contattori; ciò è strettamente condizionato da aspetti tecnici inerenti al processo produttivo e alle macchine operatrici.

Per quanto riguarda gli azionamenti a velocità variabile, siano essi del tipo per motori in c.c. che per motori in c.a. a frequenza variabile, è in genere possibile evitare il blocco dell'azionamento e/o consentire il riavviamento automatico per fenomeni di durata non superiore a poche centinaia di ms.

Si sottolinea che, indipendentemente dal tipo di rimedio adottato, è comunque necessario valutare attentamente le esigenze di ogni applicazione nell'ambito del processo produttivo, sia per decidere i provvedimenti da adottare, sia per definire con esattezza le prescrizioni da fornire al costruttore di macchine e apparecchiature.

Variazioni lente di tensione

La scelta corretta della tensione nominale, è in genere l'unico provvedimento specifico adottabile per gli apparecchi utilizzatori.

Per altro tali fenomeni possono essere in genere prevenuti attraverso una corretta concezione e gestione del sistema elettrico.

Data la notevole differenziazione esistente tra le varie tipologie di impianto, le note che

seguono non hanno l'ambizione di essere esaustive, ma vogliono semplicemente richiamare le situazioni più diffuse.

Nel caso di alimentazione in alta tensione è ormai prassi consolidata dotare i trasformatori primari di variatori sotto carico; questi ultimi, se correttamente dimensionati (campo di variazione $\pm 15\% V_N$), sono in grado di svincolare la rete a valle in MT dalle variazioni lente di tensione della rete primaria di alimentazione.

Analoghi provvedimenti possono evidentemente essere adottati dal Distributore e questi ultimi diventano determinanti nel caso di alimentazione in MT.

In tal caso non è infatti proponibile, dal punto di vista tecnico-economico, che l'utilizzatore si doti di unità regolatrici sulla trasformazione MT/BT.

Per quanto attiene agli impianti a valle è di fondamentale importanza il corretto dimensionamento dei trasformatori (potenza e tensione di cortocircuito) e dei collegamenti per contenere le variazioni di tensione da vuoto a carico entro limiti accettabili dagli utilizzatori.

È infine da non trascurare la scelta delle modalità e della programmazione dell'avviamento dei grossi motori che deve essere coordinata con le caratteristiche della rete di alimentazione.

Si fa presente inoltre il positivo effetto degli impianti di rifasamento, quando questi sono installati il più vicino possibile all'utenza finale.

Sovratensioni impulsive

Gli apparati elettronici possono essere efficacemente protetti con opportuni dispositivi a livello individuale.

Per quanto attiene ai componenti di potenza, oltre al corretto coordinamento degli isolamenti, occorre intervenire in sede di concezione dell'impianto di distribuzione.

Il principale intervento che può essere considerato è: l'installazione di scaricatori immediatamente a monte dei morsetti primari dei trasformatori alimentati dal Distributore (specialmente in presenza di linee aeree).

Le sovratensioni di origine interna sono generate da operazioni di organi di manovra in Media Tensione e la loro entità dipende, oltre che da parametri di rete, dalla tipologia dell'organo di interruzione (deionizzazione magnetica, olio, SF₆, vuoto).

In alcuni casi può essere necessario prevedere l'installazione di opportuni soppressori sulle linee MT.

Transitori di commutazione

I provvedimenti possono essere sostanzialmente di due tipi:

- corretta scelta e installazione dei conduttori di segnale (cavi schermati, vie di posa separate rispetto ai conduttori di potenza poste ad adeguata distanza, particolare cura nella realizzazione dei collegamenti verso terra degli schermi e delle apparecchiature);
- alimentazione degli azionamenti a velocità variabile da trasformatori dedicati.

Armoniche

Come già riportato nel **Cap.5**, la complessità del problema impedisce in questa sede di essere esaustivi; vengono tuttavia fornite alcune indicazioni di carattere generale ma di provata efficacia.

La propagazione delle armoniche in rete dipende, tra l'altro, dalla potenza di cortocircuito nel punto di accoppiamento (PAC e PAI). Pertanto, affinché i calcoli e i rilievi eseguiti mantengano la loro validità al variare delle condizioni di rete, è importante che queste possano essere riferite a un livello minimo garantito della potenza di cortocircuito.

In presenza di utenze generatrici di potenza armonica rilevante è utile prevedere trasformazioni e reti dedicate, trasferendo così il punto di accoppiamento con la restante parte della rete in nodi con potenza di cortocircuito superiore.

In presenza di utenze diffuse e di potenza armonica modesta, è necessario ricorrere a filtri accordati, almeno sulle armoniche di entità maggiore.

Nei casi di condensatori di rifasamento di potenza significativa, è possibile suddividere la potenza rifasante (solitamente il gradino a inserzione fissa) in tanti rami LC accordati sulle armoniche che si vuole eliminare, raggiungendo così il duplice obiettivo di proteggere i condensatori e di limitare la propagazione delle armoniche.

In particolare, nell'ambito di impianti esistenti, è fondamentale disporre di rilievi in grado di definire i contenuti armonici presenti.

Dissimmetrie e squilibri

A livello di impianto utilizzatore l'accorgimento più efficace è quello di una corretta ripartizione dei carichi monofase.

6.3 Processi sensibili

Nel contesto di uno stabilimento industriale, oltre che di apparecchi sensibili, è opportuno parlare di processi sensibili ai disturbi poiché è in prima istanza la continuità del processo produttivo primario che deve essere salvaguardata.

Il processo produttivo necessita, come è noto, per il suo funzionamento, di vettori energetici (energia elettrica, aria compressa, vapore e acqua surriscaldata) che devono essere forniti con valori ben definiti dei parametri caratteristici.

L'energia elettrica interviene poi nel processo di produzione degli altri vettori energetici. La mancanza anche di uno solo dei vettori energetici determina l'arresto del processo produttivo; da qui la necessità dell'approccio sistemico.

Con riferimento a un processo produttivo di media-alta complessità, in TAB.6-2 si illustrano le conseguenze che si possono ragionevolmente attendere a fronte di buchi di tensione/interruzioni. Quanto indicato in TAB.6-2 fa riferimento a una situazione impiantistica del tipo seguente:

- bobine contattori di stabilimento alimentate da tensione di rete;
- bobine contattori isola tecnica e utenze essenziali alimentate da UPS;
- sistemi di regolazione e controllo isola tecnica alimentati da UPS;
- memorie PLC e microprocessori derivati da rete separata da quella di potenza e realizzata con alimentatori adeguati;
- computer e controlli di livello superiore alimentati da UPS;
- sistema di protezioni elettriche adeguato.

Da quanto esposto si conclude che, nonostante i provvedimenti adottati, le conseguenze dei buchi di tensione e delle interruzioni possono essere pesanti in termini economici e ciò è tanto più vero quanto più è complesso e integrato il processo produttivo.

TAB. 6-2 Sintesi delle conseguenze dei buchi e interruzioni brevi sui processi (situazione impiantistica di riferimento descritta).

Apparecchio sensibile	Fenomeno considerato
Nessuna conseguenza sul processo produttivo primario.	Riduzione di tensione: $\Delta V < 30\% V_N$ $\Delta t \leq 80+100$ ms
Arresto del processo produttivo primario per caduta dei contattori di utenza; continuità di erogazione dei restanti vettori energetici. La ripresa della produzione si ha in un tempo dipendente dalla complessità del processo produttivo e può anche arrivare a qualche ora.	Riduzione di tensione: $\Delta V \geq 30\% V_N$ Δt tra 50 ms e 300 ms
Arresto del processo produttivo primario per caduta contattori di stabilimento. Arresto dei processi di produzione vettori energetici per intervento protezioni. I parametri dei vettori energetici si mantengono a valori tali da consentire il rapido riavviamento degli impianti di generazione. Il tempo di ripresa è comunque superiore al caso precedente.	Riduzione di tensione: $\Delta V \geq 30\% V_N$ Δt tra 300 ms e tempo limite (*)
A differenza del caso precedente occorre riportare gradualmente i parametri dei vettori energetici ai valori nominali. Il tempo di ripresa minimo è comunque di qualche ora.	Riduzione di tensione: $\Delta V \geq 30\% V_N$ $\Delta t \geq$ tempo limite (*)

(*) Tempo limite: tempo entro il quale la variazione dei parametri caratteristici dei vettori energetici rimane contenuta entro valori tali da consentire un rapido ripristino ai valori standard.

7. CRITERI PER LA REALIZZAZIONE DEGLI IMPIANTI

Particolare attenzione va posta nella fase di progettazione degli impianti elettrici. Le scelte effettuate in questa fase influenzano fortemente l'esercizio dell'impianto per lungo periodo. Si ricorda che, oltre alla Normativa e regolamentazione tecnica di riferimento per vari aspetti specifici, la legge n. 46/90 ha formalizzato i problemi pertinenti il progetto, l'installazione, il collaudo degli impianti e l'abilitazione dei professionisti operanti nel campo degli impianti tecnologici.

7.1 Concezione dell'impianto utente

Oltre alle indicazioni fornite al Cap.6 sui provvedimenti da adottare per contenere gli effetti dei disturbi, un positivo contributo alla continuità e qualità del servizio deriva dalla corretta impostazione della struttura della rete interna sia MT che BT.

Nel seguito vengono fornite alcune sintetiche indicazioni sulle possibili scelte effettuabili in merito.

7.1.1 *Classificazione degli utilizzatori*

Un passo fondamentale nel progetto di un impianto elettrico utilizzatore, specialmente in relazione alle esigenze di continuità e disponibilità dell'alimentazione, è la classificazione degli utilizzatori (come singole utenze o come aggregati di utenze) in termini di conseguenze sul funzionamento dei processi produttivi e quindi di prestazioni dell'alimentazione elettrica.

In particolare, è possibile definire carichi per i quali la mancanza dell'alimentazione ha un impatto non rilevante sulla produzione e sulla sicurezza del personale e degli impianti (sono tollerabili anche interruzioni per un tempo relativamente lungo, nell'ordine anche delle ore), o carichi per i quali, dato l'impatto che essi hanno in termini di produzione e sicurezza, è necessario che l'alimentazione sia ripristinata entro tempi generalmente brevi, compatibilmente con le esigenze del processo produttivo o del servizio svolto. E' infine possibile definire utenze o gruppi di utenze di tipo "privilegiato" (tipicamente utenze estremamente sensibili ai disturbi di rete) dal cui corretto funzionamento dipendono la sicurezza del personale, degli impianti e la corretta esecuzione di processi il cui arresto può causare rilevanti perdite di produzione e, quindi, economiche. Tutti questi elementi sono necessari per definire le esigenze di alimentazione delle differenti tipologie di utenze, portando

alla definizione degli schemi elettrici di impianto più opportuni (radiale, doppio radiale, necessità di ridondanza, ecc.) e alla scelta delle possibili sorgenti di alimentazione, "ordinaria" (generalmente fornita da un'unica sorgente di alimentazione affidabile, generalmente la rete di alimentazione del Distributore), "di riserva" e "di sicurezza" (ad esempio con l'adozione di gruppi elettrogeni, di autoproduzione, di gruppi di continuità statici o rotanti, custom power - Cap.9), il tutto nell'ottica di una valutazione generale di costi-benefici.

7.1.2 Schemi elettrici d'impianto

Distribuzione BT

- Massima semplificazione degli schemi riducendo per quanto possibile le interconnessioni tra trasformatori diversi, specialmente se realizzate attraverso collegamenti di notevole lunghezza.
- Separazione delle linee di distribuzione in funzione delle diverse tipologie degli utilizzatori (illuminazione, servizi, forza motrice ecc.).

Distribuzione MT

- Massima semplicità di schema e in particolare alimentazione radiale per i centri di carico più significativi (con eventuale doppia alimentazione).
- Anelli per quanto possibile limitati come lunghezza e come numero di derivazioni e con collegamenti tali da consentire l'alimentazione con adeguato grado di flessibilità.
- Identificazione delle linee di distribuzione e delle possibili alimentazioni in funzione delle diverse tipologie degli utilizzatori.

Ridondanza ed indipendenza

- La continuità di servizio è anche garantita da un'adeguata ridondanza d'impianto, intesa come l'esistenza di uno o più componenti d'impianto (cavi, trasformatori, interruttori ecc.) che possono, in sostituzione dei componenti omologhi, assumerne le funzioni. L'entità dei componenti è legata sia al singolo componente, sia al rapporto costi-benefici. Non necessariamente un elemento ridondante deve essere "attivo" nella rete, collegato e pronto per il funzionamento, ma la ridondanza può infatti essere assicurata anche da elementi disponibili a magazzino. In questo ultimo caso è fondamentale considerare il tempo di attivazione indipendente da automatismi di commutazione, ma dai tempi di intervento degli operatori. Al concetto di ridondanza è associato necessariamente quello di "indipendenza": il miglioramento delle condizioni di funzionamento è ottenibile solo se i due elementi non vanno fuori servizio contemporaneamente per la medesima causa (manutenzione, guasto, ecc.).

Considerazioni analoghe possono essere svolte per i gruppi di riserva, continuità, sicurezza, sistemi di controllo, supervisione ecc., nonché per i dispositivi e circuiti di protezione.

Autoproduzione

- La presenza di gruppi di autoproduzione consente il mantenimento in marcia isolata di quota parte dei carichi di stabilimento a seguito di guasti sulla rete esterna che provochino la mancanza dell'alimentazione da parte del Distributore. Affinché tale funzionamento possa realizzarsi, si rende necessaria un'impostazione coerente dell'impianto di potenza, con la creazione di sezioni di rete privilegiata (destinata al funzionamento in isola) e del ciclo termico asservito all'autoproduzione nel caso di cogenerazione.

7.1.3 Protezioni e loro coordinamento

La tipologia delle protezioni installate sia a valle che a monte del punto di consegna e la loro taratura devono essere coordinate al fine di garantire, da un lato, il corretto esercizio della rete del Distributore e, dall'altro, la continuità di servizio e l'integrità degli impianti utilizzatori.

In particolare, le problematiche relative al coordinamento tra le protezioni degli impianti dei clienti e quelle di rete sono fondamentali affinché guasti negli impianti dei clienti non si possano propagare a livello della rete di distribuzione, causando interruzioni anche ad altri clienti connessi alla stessa linea di alimentazione con un peggioramento della qualità della fornitura.

Tali questioni sono state affrontate dall'AEEG e dai Distributori, con la definizione di proprie regole di allacciamento alla rete (nel caso di Enel Distribuzione il documento DK5600¹⁰ per gli allacciamenti dei clienti alla rete MT). Indicazioni relative alla selettività delle protezioni del Cliente e della rete pubblica sono fornite anche nella Guida CEI 11-35¹¹.

Occorre ricordare che elemento fondamentale nel coordinamento delle protezioni è la potenza di cortocircuito che la rete di alimentazione presenta nel punto di accoppiamento comune. Il valore di tale parametro è da ritenersi variabile in funzione sia della "posizione" in rete del punto di accoppiamento comune, sia del fatto che la configurazione stessa della rete può essere soggetta a cambiamenti a causa della necessità di garantire un'adeguata continuità del servizio (rialimentazioni in MT a seguito di guasti, lavori di manutenzione e costruzione, ecc.).

Nel seguito (vedi **TAB.7-1**) si considera un impianto tipico privo di autoproduzione; per esso, partendo dall'utilizzatore, vengono indicati i criteri di scelta principali delle protezioni da

¹⁰ DK5600 "CRITERI DI ALLACCIAMENTO DI CLIENTI ALLA RETE MT DELLA DISTRIBUZIONE"

¹¹ Il documento, "Guida per l'esecuzione di cabine elettriche MT/BT del Cliente/utente finale", non ha validità di Norma ma semplicemente di Guida il cui scopo è quello di dare indicazioni per il progetto e la costruzione delle cabine in conformità alle Norme CEI e fornire indicazioni di chiarimento.

adottare (la taratura delle protezioni secondo criteri di selettività dovrà essere realizzata in base a quanto indicato dal Distributore o dal Gestore della rete di trasmissione nazionale, per i Clienti AT, nei documenti che definiscono i criteri di allacciamento alla propria rete).

Le indicazioni fornite sono relative a un possibile assetto. Installando ulteriori protezioni, quali, ad esempio, quelle differenziali a filo pilota sui collegamenti MT, è possibile contenere ulteriormente il tempo di eliminazione dei guasti.

Si tratta in definitiva di valutare il rapporto costi-benefici (maggiore costo dell'assetto protettivo e risparmio nel dimensionamento dei componenti) per stabilire la convenienza di assetti più sofisticati. La presenza di gruppi di autoproduzione del Cliente rende molto più complessa la definizione dell'assetto di protezione, sia per quanto attiene alla rete interna di stabilimento sia per quanto attiene alle protezioni generali (in corrispondenza del punto di consegna del Distributore), di interfaccia e del generatore, le cui caratteristiche e coordinamento sono definiti nella normativa di riferimento per gli autoproduttori MT (CEI 11-20¹²) e nella documentazione tecnica del Distributore (documento di Enel Distribuzione DK 5740).

Nel caso in cui i sistemi di autoproduzione sono di tipo termico e gestiti in cogenerazione, è inoltre di fondamentale importanza, oltre a quanto già ribadito, garantire la massima continuità di servizio di tali gruppi in quanto asserviti alla produzione dei vettori energetici necessari al processo produttivo primario.

A titolo d'esempio con riferimento alla **FIG.7-1**, per un impianto dotato di gruppi di autoproduzione allacciato alla rete pubblica di distribuzione in Media Tensione (sistema di II categoria), si riportano le indicazioni prescritte dalla norma **CEI 11-20** in merito alle funzioni che devono essere assolte dallo schema di collegamento (**TAB.7-2**) ed i requisiti principali relativi al coordinamento delle protezioni ed alle loro caratteristiche, nel caso delle protezioni agenti sul dispositivo di interfaccia e del generatore (**TAB.7-3 e TAB.7-4**).

Problematiche analoghe si presentano anche in presenza di gruppi di continuità e, nel caso siano essi statici, analizzate nella normativa CEI 11-20 (par. 9.1).

7.2 Isolamento

Affinché i provvedimenti contro le sovratensioni interne ed esterne citate al Cap. 6 risultino pienamente efficaci, è fondamentale la scelta coerente di livelli di isolamento dei vari componenti. Si evidenzia che i componenti di un sistema MT, gestito a neutro isolato, devono sopportare a tempo indeterminato una tensione verso terra pari a quella concatenata.

Indicazioni utili alla scelta dei livelli di isolamento e ai livelli protettivi sono date al Cap.8.

¹² CEI 11-20 "Impianti di produzione di energia elettrica e gruppi di continuità collegati a reti di I e II categoria"

7.3 Manutenzione

La manutenzione preventiva è uno strumento efficace per migliorare la disponibilità degli impianti, per eliminare molti dei guasti e quindi, in definitiva, i disturbi a questi ultimi associati. In particolare si richiama l'attenzione sui guasti delle cabine ricevatrici le cui conseguenze si ripercuotono sull'intero sistema e quindi sugli altri Clienti.

TAB. 7-1 Tipologia di protezioni per impianti di utenza non dotati di autoproduzione

Sezione/ Elemento di impianto	Tipologia protezioni	Tipo di guasti Criteri di taratura
Utilizzatore BT	Massima corrente	Cortocircuito / Sovraccarico (cortocircuito a intervento istantaneo)
	Minima tensione	A intervento ritardato per evitare sovracorrente di accelerazione in presenza di contattori alimentati da gruppo di continuità.
Montanti trasformatore MT/BT	Relè a sviluppo di gas (Buchholz) Massima temperatura	Intervento istantaneo.
	Massima corrente lato MT e BT	I criteri di selettività e scelta del sistema di protezione sono indicati nella norma CEI 11-35
Utenze MT	Unità protezione motore (massima corrente, immagine termica, protezioni di terra, sequenza inversa)	Sovraccarico Cortocircuito Funzionamento monofase Guasto
Collegamenti MT	Massima corrente	Cortocircuito / Sovraccarico I criteri di scelta del sistema di protezione sono indicati dal Distributore
	<ul style="list-style-type: none"> • Protezione direzionale di terra adatta al funzionamento sia con neutro isolato che compensato (se la lunghezza dei collegamenti è tale da richiederne l'utilizzo). • Massima corrente omopolare 	Guasto monofase a terra I criteri di scelta del sistema di protezione sono indicati dal Distributore
Montante trasformatore AT/MT	Relè a sviluppo di gas (Buchholz) Massima temperatura Differenziale	Intervento istantaneo
	Massima corrente	Massima corrente MT con selettività cronometrica con le protezioni sulle linee MT. Massima corrente AT con selettività amperometrica rispetto a guasti lato MT.
Collegamento AT al Distributore	Massima corrente in esecuzione tripolare a due soglie di intervento a tempo indipendente	Cortocircuito / Sovraccarico

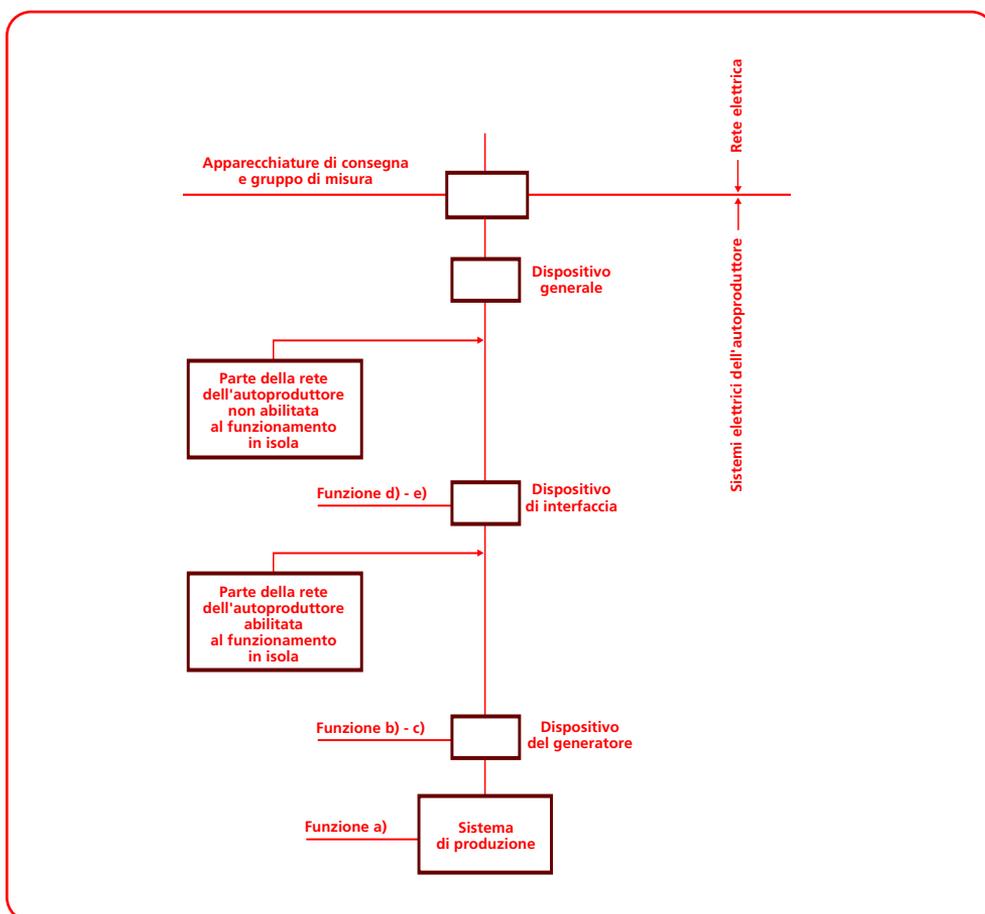


FIG. 7-1 | Schema di collegamento alla rete pubblica MT di un autoprodotto (CEI 11-20)

TAB. 7-2 | Funzioni assolte dallo schema di collegamento alla rete MT di un impianto di autoproduzione (CEI 11-20)

Funzione da assolvere (con riferimento alla FIG. 7-1)	
a)	Aviamento, esercizio, arresto dell'impianto in condizioni normali
b)	Arresto del generatore in presenza di guasti o funzionamenti anomali nell'impianto di produzione
c)	Intervento coordinato dei dispositivi del generatore e della rete del produttore per guasti durante funzionamento in isola
d)	Intervento coordinato del dispositivo di interfaccia con quelli del generatore, del generale e della rete pubblica, per guasti o funzionamenti anomali interni alla rete del produttore durante il funzionamento in parallelo
e)	Distacco dell'impianto di produzione nel caso di guasti o funzionamenti anomali della rete o per aperture intenzionali dell'interruttore della rete pubblica

TAB. 7-3 Coordinamento dei dispositivi di protezione

Evento	Dispositivo della rete pubblica	Dispositivo generale	Dispositivo di interfaccia	Dispositivo di generatore
Guasto o funzionamento anomalo della rete pubblica	SI 1° livello	NO	SI 2° livello	SI 3° livello
Guasto o funzionamento anomalo della rete del produttore	SI 3° livello	SI 1° livello	SI 2° livello	SI 3° livello
Guasto sull'impianto di produzione	NO	SI 3° livello	SI 2° livello	SI 1° livello

Nota In caso di guasto o funzionamento anomalo di linee appartenenti alla rete pubblica con dispositivo di richiusura rapida, i dispositivi che assolvono le funzioni d) - e) devono intervenire prima di tale dispositivo. Ove il primo livello interessi più dispositivi per lo stesso evento, l'intervento di uno solo di questi dispositivi può escludere l'intervento dei rimanenti (se il guasto risulta essere eliminato). Il terzo livello riguarda gli interventi del dispositivo di ricalzo ai dispositivi dei livelli di intervento inferiori.

Coordinamento dei dispositivi di protezione per collegamento mediante linea dedicata

Evento	Dispositivo della rete pubblica	Dispositivo di interfaccia	Dispositivo di generatore
Guasto o funzionamento anomalo della rete pubblica	SI 1° livello	SI 2° livello	SI 3° livello
Guasto o funzionamento anomalo della rete del produttore	SI 1° livello	SI 2° livello	SI 3° livello
Guasto sull'impianto di produzione	SI 3° livello	SI 2° livello	SI 1° livello

TAB. 7-4 Protezioni per la rete pubblica che agiscono sul dispositivo di interfaccia, del generatore (CEI 11-20)

Tipologia protezioni	Intervento	
Protezioni del dispositivo di Interfaccia (funzioni d) - e) di TAB.7-2)	Min - Max frequenza	Senza ritardo intenzionale
	Minima tensione	Ritardato
	Massima tensione	Senza ritardo intenzionale
	Massima tensione omopolare (*)	Ritardato
	Protezione contro perdita rete (**)	Senza ritardo intenzionale
Protezioni del dispositivo del Generatore (reti in isola - funzione c) di TAB.7-2)	Min - Max frequenza	Senza ritardo intenzionale
	Minima tensione	Ritardato
	Massima tensione	Senza ritardo intenzionale
	Massima tensione omopolare	Ritardato

(*) La protezione è prevista per impianti aventi potenza complessiva maggiore di 200 kVA

(**) Da concordarsi tra produttore e Distributore in funzione delle caratteristiche della rete pubblica, ad esempio quando la potenza della generazione distribuita è sostanzialmente equivalente a quella dei carichi passivi alimentati dallo stesso trasformatore.

8. CRITERI DI SCELTA DELLE APPARECCHIATURE RELATIVAMENTE AI LIVELLI DI IMMUNITÀ

Le presenti specifiche, che riguardano le linee guida sia per l'aspetto costruttivo che per quello di impiego, sono riferite ai livelli di immunità, relativi ai disturbi presenti nell'alimentazione elettrica, e ai livelli di isolamento.

Si ricorda che i livelli di immunità coincidono con i valori di prova sulle apparecchiature in sede di prove di tipo e accettazione.

Nella stesura della specifica deve essere indicato l'ambiente elettromagnetico industriale nel quale l'apparecchiatura sarà installata (par. 3.3).

Le apparecchiature esaminate sono suddivise in:

- apparecchiature di potenza
- apparecchiature elettriche/elettroniche di controllo, di trasmissione e di misura.

8.1 Apparecchiature di potenza

Sono prese in esame le apparecchiature di potenza che operano in ambiente industriale descritto attraverso i livelli di compatibilità delle classi 2 e 3 indicate in Appendice B; quando non specificatamente indicato, si fa riferimento alla classe 3 (livelli di disturbo delle sbarre più inquinate dell'impianto).

Per i principali disturbi condotti vengono presi in esame i componenti il cui dimensionamento è più influenzato da detti disturbi.

Naturalmente tutto l'impianto (Cap.7) deve essere progettato in maniera coerente, per esempio, evitando cadute intempestive dei contattori o considerando le conseguenze sul processo produttivo derivanti dal comportamento della macchina azionata dal motore elettrico.

Variazioni di frequenza di rete

Questo tipo di disturbo può influenzare il progetto dei filtri per il controllo della distorsione armonica.

Particolare attenzione dovrà essere dedicata a quei casi in cui esiste autoproduzione ed è previsto, in certe situazioni di emergenza, il funzionamento isolato dalla rete pubblica.

Sovratensioni a frequenza industriale transitorie e impulsive (tutti i componenti di potenza)

Un buon coordinamento dell'isolamento è assicurato adottando:

- i livelli di isolamento riportati in **TAB. 8-1** (CEI EN 60071-1¹³). Tali livelli si riferiscono a sollecitazioni a frequenza industriale e alla forma d'onda a impulso normalizzata 1,2/50 ms, rappresentativa di impulsi di origine atmosferica (FIG. 8-1);
- un margine fra livelli di isolamento e livelli protettivi assicurati da scaricatori e/o spinterometri riferiti all'impulso, che può essere orientativamente dell'ordine:
 - ≥ del 40% per tensioni nominali ≤ 36 kV
 - ≥ del 30% per tensioni nominali ≥ 52 kV.

Le indicazioni sopra fornite presentano una valenza di carattere generale e prescindono da casi specifici derivanti da eccezionali ambienti elettromagnetici e/o tassative indicazioni dei comitati di prodotto per singoli apparati di potenza.

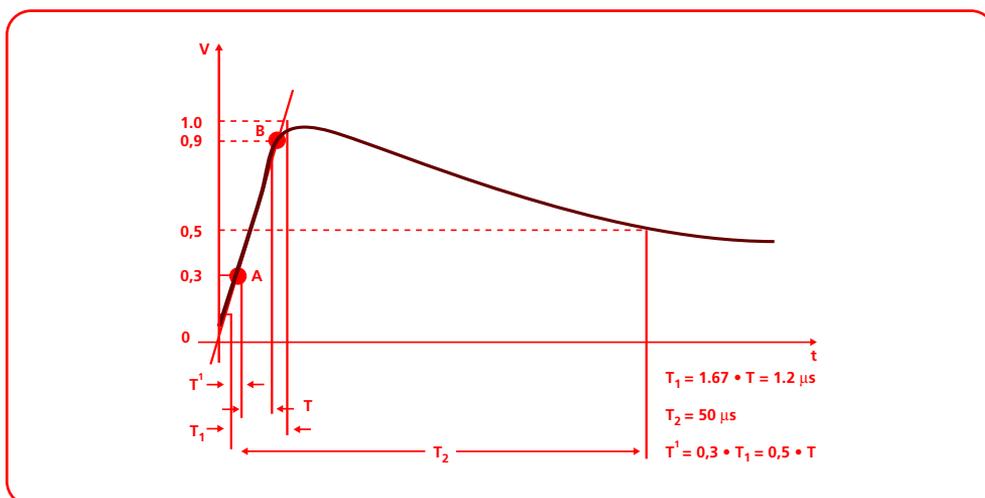


FIG. 8-1 Impulso normalizzato 1,2/50 μs

Buchi di tensione e brevi interruzioni (motori in MT e BT)

Questo disturbo è estremamente critico per i motori, sia allacciati direttamente alla rete a 50 Hz che alimentati tramite ponti di conversione, e ne influenza il dimensionamento in relazione allo specifico processo produttivo.

Qualunque sistema di alimentazione (rete pubblica e/o interna all'impianto) presenta un livello

¹³ CEI EN 60071-1: "Coordinamento dell'isolamento - Parte 1: Definizioni, principi e regole"

fisiologico di disturbo non eliminabile, ma con una frequenza maggiore in corrispondenza a determinati campi di riduzione di tensione e di durata.

I livelli di immunità consigliati sono riportati in **TAB. 8-2**. Tali livelli si possono ottenere con modifiche di progetto e/o di modalità operative del motore e devono essere valutate sulla base di un bilancio costi-benefici.

Si sottolinea, inoltre, che i medesimi livelli di immunità devono essere soddisfatti anche per le apparecchiature di controllo.

Il livello di immunità 1 può essere conseguito senza particolari oneri economici. I livelli di immunità 2 e 3, che comprendono le prestazioni dei livelli inferiori, sono riportati in ordine di crescente onerosità.

Per un'utenza industriale alimentata da una rete mista (cavo/linea aerea), i livelli di immunità di **TAB. 8-2** comportano una riduzione dei fuori servizi attesi (con probabilità al 95%) indicata in **TAB. 8-3**.

Armoniche e interarmoniche

Condensatori di rifasamento (esclusi i filtri) in MT e BT

Sono i componenti più sensibili a questo disturbo in termini di sollecitazioni sia a lunga durata (effetto Joule) che a breve durata.

Tali sollecitazioni sono funzione del valore delle singole armoniche presenti nella tensione di alimentazione a pari distorsione totale.

La sollecitazione a breve durata si può controllare con reattanze di basso valore in serie al condensatore.

Il dimensionamento sia in corrente sia in tensione dei condensatori deve essere effettuato secondo quanto prescritto dalla corrispondente normativa¹⁴

Condensatori di rifasamento per filtri passivi accordati in MT e BT

Il dimensionamento del banco di condensatori di rifasamento abbinato a un filtro accordato deve essere fatto con interventi specifici tenendo conto dell'effettiva corrente efficace nel condensatore.

Tale corrente è funzione delle emissioni armoniche dell'impianto industriale e del limite di emissione in corrente imposto dal Distributore.

¹⁴ Ad esempio: CEI 33-7 "Condensatori statici di rifasamento per impianti di energia a corrente alternata con tensione nominale superiore a 1000 V" e CEI EN 61642 "Reti industriali in corrente alternata affette da armoniche - Applicazione di filtri e di condensatori statici di rifasamento".

Motori trifase e monofase in MT e BT

Si considerano i motori alimentati direttamente a 50 Hz dalla rete, escludendo motori alimentati tramite ponti di conversione.

Pur essendo i motori poco influenzati dal contenuto armonico della tensione, con riferimento alla classe 3 si raccomanda di adottare i seguenti valori di declassamento in potenza¹⁵:

- **Motori monofase:** declassamento pari al 5%
- **Motori trifase:** declassamento pari al 3%.

Trasformatori

I trasformatori non sono influenzati in modo sostanziale dalla distorsione armonica di tensione prevista dai livelli di compatibilità.

Al contrario all'atto della stesura delle specifiche costruttive del trasformatore è da tenere presente la distorsione della corrente provocata da un eventuale carico. Tale distorsione è funzione dell'applicazione e non può essere regolamentata a priori.

Dissimmetria nella tensione

Motori trifase in MT e BT

Per i motori alimentati direttamente a 50 Hz dalla rete, escludendo motori alimentati tramite ponti di conversione, si raccomanda di adottare i seguenti valori di declassamento:

- declassamento pari al 15% per la classe 3
- declassamento pari al 5% per la classe 2.

Convertitori

Si evidenzia che i convertitori generano correnti armoniche superiori a quelle attese se sono alimentati con tensione eccessivamente dissimmetrica.

¹⁵ Per declassamento si intende l'impiego del motore a potenza inferiore a quella nominale (per es. declassamento del 5% vuol dire impiego del motore a una potenza non superiore al 95% della potenza nominale)

TAB. 8-1 Livelli di isolamento standard per tensione massima di funzionamento

1 kV < Um < 245 kV

Massima tensione di funzionamento U _m (kV efficaci)	Tenuta di breve durata a 50 Hz (kV efficaci)	Tenuta ad impulso 1,2/50 μs (kV picco)
3,6	10	20 40
7,2	20	40 60
12	28	60 75
17,5	38	75 95
24	50	95 125 145
36	70	145 170
52	95	250
	140	325
72,5	185 (*) 230	450 550
123	185 (*) 230	450 (*) 550
145	275	650
170	230 (*) 275 325	550 (*) 650 750
245	275 (*) 325 (*) 360 395 460	650 (*) 750 (*) 850 950 1050

(*) Se questi valori sono insufficienti per provare che le tensioni di tenuta specificate tra le fasi sono soddisfatte, sono necessarie prove complementari di tenuta tra le fasi.

TAB. 8-2 Livelli di immunità per buchi di tensione e brevi interruzioni per i motori

Livelli di immunità	Buco di tensione e interruzione breve ΔV (%)	Δt (s)	Applicazione
1	30	1	Tutti
2 (*)	60	0,75	Quando conviene dal punto di vista tecnico-economico
3 (**)	100	0,5	

(*) il livello 2 comprende le prestazioni del livello 1.

(**) il livello 3 comprende le prestazioni del livello 1 e 2.

TAB. 8-3 Riduzione dei fuori servizio dei motori per buchi di tensione e interruzioni brevi per i livelli di immunità riportati in TAB. 8.2

Livello di immunità	Riduzione percentuale fuoriservizio
1	60 %
2	80 %
3	90 %

8.2 Apparecchiature elettriche/elettroniche di controllo, di misura e di trasmissione

8.2.1 Livelli di immunità ai disturbi

I livelli di immunità ai disturbi sono definiti dalla normativa EMC relativa alle prove di immunità alle varie tipologie di disturbo o dalla normativa di prodotto.

I livelli di immunità sono relativi a:

- disturbi correlati alla frequenza di rete (condotti);
- disturbi transitori e ad alta frequenza (condotti);
- disturbi magnetici ed elettromagnetici (irradiati);
- scariche elettrostatiche;

e riferiti alle porte (ingresso/uscita) dell'apparecchiatura:

- alimentazione di potenza (a 50 Hz e/o in corrente continua);
- controllo e/o segnale;
- involucro.

I valori relativi ai livelli di immunità per le apparecchiature sono definiti sia nella normativa di prodotto, sia in quella EMC relativa alle prove di immunità alle varie tipologie di disturbo.

In relazione alla valutazione dell'affidabilità dell'apparecchiatura, la normativa EMC relativa alla definizione delle prove di immunità prevede, salvo diverse indicazioni formulate dai comitati di prodotto o dalle specifiche di prodotto, i **seguenti livelli di prestazione**:

- A) normali prestazioni entro i limiti della specifica;
- B) temporanea degradazione o perdita di funzionamento e auto-ripristino delle prestazioni;
- C) temporanea degradazione o perdita di funzionamento e ripristino delle prestazioni con

intervento dell'operatore o resettaggio del sistema;

D) permanente degradazione o perdita di funzionamento (non ripristinabile) dovuto a un guasto all'apparecchiatura (componenti), od al software, o perdita di dati.

La scelta del livello di immunità è funzione:

- del grado di affidabilità (livello di prestazione) che si intende ottenere per l'apparecchiatura;
- della classe di ambiente elettromagnetico e degli eventuali mezzi di riduzione dell'accoppiamento fra fonte di disturbo e apparecchio sensibile;
- dei vincoli tecnico-economici per assicurare determinati livelli di immunità.

8.2.2 Livelli di isolamento

Si raccomanda di adottare i valori prescritti dalla normativa¹⁶, inclusa quella di prodotto.

Valori indicativi per i livelli di isolamento, sono:

- tenuta a impulso 1,2/50 ms: 4 kVp (6 kVp in casi particolari)
- tenuta a 50 Hz: 2 kVrms
- tenuta in c.c.: 3 kVc.c.
- resistenza di isolamento: 100 MW.

I livelli di isolamento di cui sopra sono validi per tutte le porte dell'apparecchiatura.

¹⁶ Ad esempio: CEI EN 60664-1 "Coordinamento dell'isolamento per le apparecchiature nei sistemi a Bassa Tensione. Parte 1: Principi, prescrizioni e prove".

9. APPARECCHIATURE PER LA LIMITAZIONE DEI DISTURBI DA INSTALLARE NEGLI IMPIANTI

Nel presente capitolo vengono fornite indicazioni relativamente ad alcune tipologie di dispositivi da installare negli impianti, al fine di limitare sia gli effetti provocati dai disturbi di rete sul funzionamento di apparecchi e processi sensibili, sia, in taluni casi, le emissioni di disturbi da parte dei carichi.

In generale la scelta della tipologia di dispositivo dipende:

- dal disturbo da compensare/limitare;
- dalla sensibilità delle apparecchiature al disturbo in esame;
- dalle limitazioni imposte, da parte del Distributore, sui livelli di emissione del disturbo;
- dalla classificazione dell'utenza o dell'insieme di utenze in termini di conseguenze sul funzionamento dei processi produttivi e quindi di prestazioni dell'alimentazione elettrica (Cap.7);
- dalla struttura della rete di alimentazione dei carichi e dalla scelta della sorgente di alimentazione più opportuna ("ordinaria", "di riserva" e "di sicurezza") (Cap.7);
- da valutazioni economiche di costi-benefici, basate, ad esempio nel caso di desensibilizzazione dai disturbi di rete, essenzialmente sulla definizione dei costi derivanti da un'interruzione del processo di produzione per effetto del disturbo di rete, dei costi di acquisto e "mantenimento" del dispositivo e dei vantaggi economici dovuti alle evitate interruzioni della produzione a seguito dell'installazione del dispositivo di compensazione.

9.1 Gruppi di continuità (UPS: Uninterruptible Power Systems)

I gruppi di continuità rappresentano dispositivi in grado di elevare la qualità dell'alimentazione della rete di distribuzione pubblica o dell'impianto elettrico dell'utente a monte del nodo di installazione del gruppo, operando come un'interfaccia in grado di filtrare i disturbi provenienti dalla rete stessa e garantendo, per un tempo prestabilito, l'alimentazione dei carichi senza interruzione (funzione come riserva)¹⁷.

¹⁷ Non tutti i sistemi in grado di accumulare o generare potenza elettrica in prossimità del punto di utilizzazione sono classificabili come UPS. Ad esempio, i gruppi elettrogeni tradizionali sono esclusi da questa classificazione, in quanto non sono in grado di sostenere la tensione durante un buco o un'interruzione transitoria.

Questi dispositivi, tenuto conto della probabilità di una propria indisponibilità per guasto, non possono tuttavia assicurare un annullamento dei casi di interruzione della fornitura dell'energia, ma solo ridurne drasticamente il numero rispetto a quelli che si avrebbero con alimentazione diretta dalla rete elevando, in generale, l'affidabilità del sistema di alimentazione.

Nella rappresentazione base di un sistema di continuità si possono individuare principalmente un sistema di conversione, di accumulo e di generazione. In funzione delle caratteristiche del sistema di accumulo, è possibile operare una prima distinzione tra:

- gruppi di continuità a riserva limitata in cui la fonte di energia secondaria, rappresentata da sistemi di accumulo elettrochimico (batterie di accumulatori) e cinetico (volani), non consente lunghi periodi di alimentazione in assenza di rete;
- gruppi di continuità a "riserva illimitata"¹⁸ in cui si ha a disposizione una fonte di energia secondaria rifornita dall'esterno e che comporta costi di stoccaggio di materie prime (riserva di combustibile per azionare un motore primo, ad esempio motore diesel, gas, etc.).

Un sistema del tipo a riserva limitata, se integrato con dispositivi capaci di utilizzare altri tipi di accumulo, può naturalmente divenire di tipo a riserva illimitata: nel caso di accumulo elettrochimico è possibile realizzare una rete di soccorso alimentata da un sistema motore primo - generatore, in cui la batteria deve fornire energia solo per il periodo necessario all'avviamento del motore primo (FIG.9-1).

Una ulteriore classificazione tra i gruppi di continuità può essere realizzata in funzione delle caratteristiche del sistema di generazione, individuando gruppi di continuità statici (basati sull'impiego di convertitori elettronici di potenza e con sistema di accumulo in c.c., in genere di tipo elettrochimico ma anche capacitivo o induttivo a superconduttori) e rotanti (basati sull'impiego di macchine rotanti, con accumulo costituito da volani ad elevata inerzia). È possibile avere gruppi di continuità "ibridi" in cui sono presenti componenti sia statici sia rotanti.

Le taglie tipiche per ogni tipologia di gruppo di continuità, sono indicativamente:

- *Statico*: da 0 a 1000 kVA;
- *Rotante MT*: da 1000 kVA a 5000 kVA;
- *Rotante BT*: da 100 kVA a 1500 kVA;
- *Ibrido*: da 100 kVA a 1000 kVA.

Potenze superiori possono essere ottenute connettendo in parallelo più unità singole

¹⁸ Anche in questo caso sarebbe più corretto parlare di una "riserva limitata" la cui autonomia è limitata da quella della fonte di energia esterna: in ogni caso si tratterebbe di autonomie nettamente superiori a quelle ottenibili con accumuli elettrochimici (dell'ordine dei 10÷15 minuti) o con volani (dell'ordine di 1 secondo).

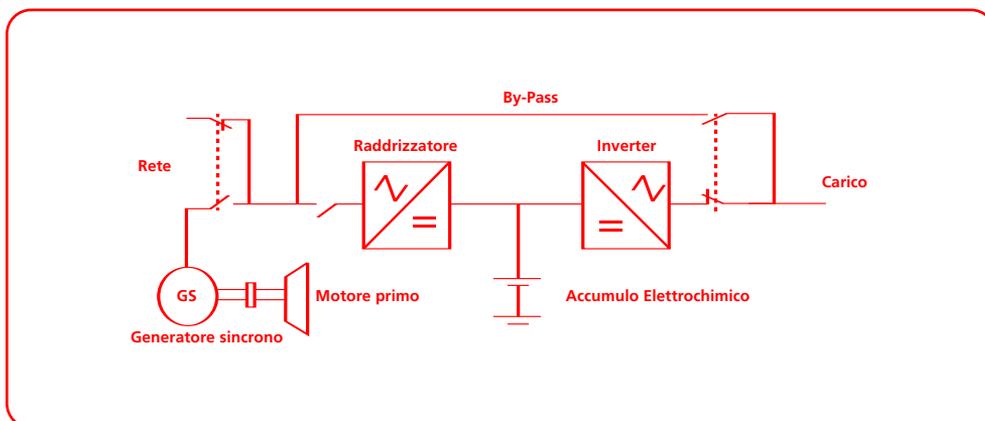


FIG. 9-1 Gruppo di continuità a riserva limitata integrato con un sistema motore primo - generatore (sistema a riserva illimitata)

In relazione alle problematiche di inserimento in rete dei gruppi di continuità, si ricorda come, nel caso dei gruppi di continuità statici, queste sono regolate dai requisiti definiti nella norma **CEI 11-20**¹⁹ che, essenzialmente, prevede per tali dispositivi un comportamento assimilabile ad un carico passivo, durante il funzionamento in parallelo alla rete di alimentazione pubblica. La norma, relativamente alle problematiche di sicurezza contro i contatti indiretti, tratta anche la modalità della gestione del neutro.

I limiti di emissione e le prescrizioni di immunità essenziali di compatibilità elettromagnetica sono forniti dalla norma **CEI EN 50091-2**²⁰, relativamente alle singole unità di UPS od a sistemi di più UPS interconnessi in un unico sistema di alimentazione, collegati alle reti di alimentazione a Bassa Tensione industriali o pubbliche, con esclusione degli UPS rotanti e degli alimentatori elettronici.

9.1.1 Gruppi di continuità statici

Sono sistemi caratterizzati da una riserva di energia secondaria limitata, rappresentata da batterie di accumulatori il cui dimensionamento, soggetto a limitazioni di costo ed ingombro, determina normalmente autonomie dell'ordine dei 10 ÷ 15 minuti.

¹⁹ **CEI 11-20**: "Impianti di produzione di energia elettrica e gruppi di continuità collegati a reti di I e II categoria".

²⁰ **CEI EN 50091-2**: "Sistemi statici di continuità (UPS) Parte 2: Prescrizioni di compatibilità elettromagnetica (EMC)".

Prescindendo dalle varie versioni realizzate in sede costruttiva è possibile, in base al principio di funzionamento, classificare i gruppi di continuità statici in:

- gruppi di continuità statici di soccorso (in stand-by);
- gruppi di continuità statici del tipo a monoconversione;
- gruppi di continuità statici del tipo a doppia conversione.

Gruppi di continuità statici di soccorso (in stand-by)

In condizioni di funzionamento normale con tensione di rete nei limiti fissati dalle tolleranze, il carico viene alimentato direttamente dalla rete (FIG.9-2). Ogni volta che la tensione di alimentazione esce dalle tolleranze, dopo una breve interruzione nella fornitura di energia dell'ordine di alcuni millisecondi (di solito inferiore ai 10 ms), si ha la commutazione del carico dalla rete all'inverter. Mentre il raddrizzatore è dimensionato per garantire la sola carica della batteria, l'inverter deve poter garantire al carico la potenza nominale per un tempo pari all'autonomia della batteria stessa.

Questi gruppi, disponibili tipicamente per potenze fino a qualche kVA (generalmente 2 kVA), presentano il limite di trasmettere al carico, durante il funzionamento normale, tutte le variazioni della tensione di rete che sono contenute entro le tolleranze.

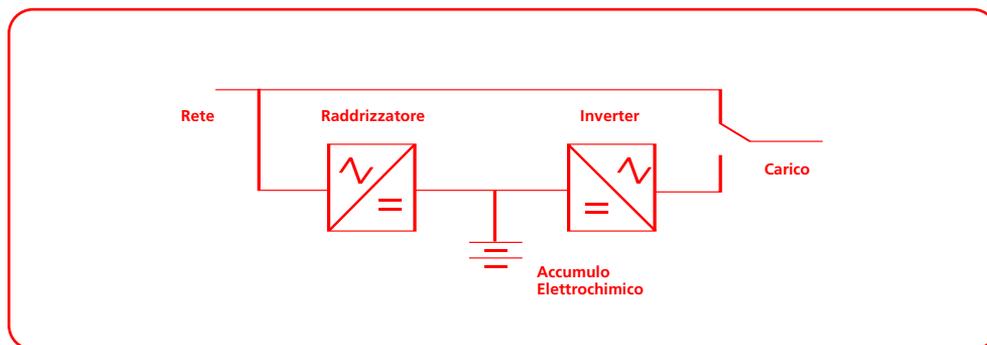


FIG. 9-2 | Schema a blocchi di un gruppo di continuità statico di soccorso (stand-by)

Gruppi di continuità statici del tipo a monoconversione (UPS con funzionamento interattivo)

In condizioni di funzionamento normali il carico viene connesso alla rete di alimentazione: è presente un solo elemento di conversione che si comporta da raddrizzatore od inverter in funzione della qualità della tensione di rete (FIG.9-3).

Per tensione variabile entro le tolleranze si ha un funzionamento da raddrizzatore operando un'azione di regolazione della tensione fornita al carico mediante il controllo del sistema di conversione, in modo da assorbire una corrente tale che componendosi vettorialmente con quella assorbita dal carico determina una caduta di tensione sull'induttanza L che produce un effetto stabilizzante. Nel contempo viene mantenuta in carica la batteria.

Nel caso in cui la tensione di rete esca dalle tolleranze il convertitore viene comandato per un funzionamento da inverter e la batteria fornisce l'energia necessaria al carico, per un tempo legato alla sua autonomia. Per evitare ritorni di energia verso la rete viene comandata l'apertura di un contattore o di un dispositivo statico.

Il limite di potenza di questi gruppi è di qualche decina di kVA (massimo 50 kVA): poiché l'induttanza risulta normalmente percorsa dalla corrente di carico non è consigliato l'utilizzo per potenze superiori.

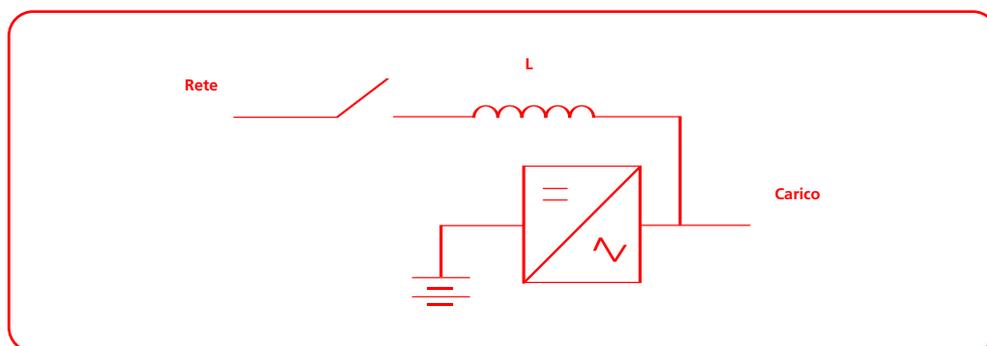


FIG. 9-3 Schema a blocchi di un gruppo di continuità statico del tipo a monoconversione (il contattore per la separazione dalla rete può essere sostituito da un dispositivo statico)

Gruppi di continuità statici del tipo a doppia conversione (on-line UPS)

Sono dispositivi inseriti in serie al carico e garantiscono le migliori prestazioni. Tipicamente sono costituiti da (FIG.9-4):

- un convertitore ca/cc normalmente del tipo "totalmente controllato" (a tiristori) a commutazione naturale;
- una batteria che fornisce l'energia necessaria al carico in caso di mancanza di rete;
- un inverter statico a commutazione forzata che opera la conversione cc/ca;
- un commutatore statico;
- un complesso di sezionatori (o IMS) per garantire il sezionamento di ogni componente del gruppo di continuità in caso di manutenzione.

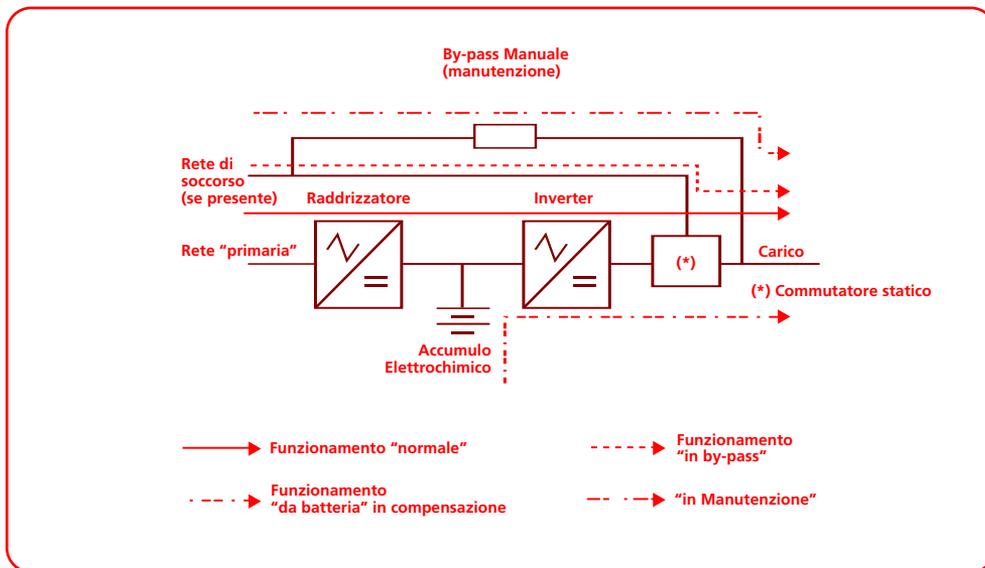


FIG. 9-4 | Schema a blocchi di un gruppo di continuità statico a doppia conversione (on-line)

Durante il funzionamento normale l'energia viene fornita al carico dal gruppo di continuità attraverso la serie rete - raddrizzatore - inverter, stabilizzando la tensione di alimentazione esente da perturbazioni o transitori; la batteria viene mantenuta in carica.

In caso di mancanza o anomalia della tensione di rete la batteria, tramite l'inverter, provvede a fornire l'energia al carico per un tempo limitato dalla sua autonomia. Al rientro nelle tolleranze della tensione di rete si ripristina automaticamente il funzionamento normale: il raddrizzatore fornisce l'energia all'inverter e quindi al carico e contemporaneamente provvede alla ricarica della batteria.

Per sovraccarichi o corto circuiti eccedenti i limiti di dimensionamento dell'inverter o per anomalia o guasto dello stesso, il commutatore provvede a garantire l'alimentazione del carico commutandolo su una rete di soccorso (se presente) o sulla stessa rete di alimentazione primaria. Il ritorno all'alimentazione da inverter avviene al ripristinarsi del funzionamento normale, verificato il sincronismo della tensione di uscita con quella di rete.

Qualora risultasse necessario operare della manutenzione preventiva e correttiva è possibile garantire l'isolamento del gruppo dalla rete e l'alimentazione del carico, commutandolo sulla rete di soccorso (se presente) o di alimentazione primaria, senza interruzione.

Problematiche connesse all'impiego di gruppi statici di continuità

L'impiego di gruppi statici di continuità per garantire al carico una maggiore disponibilità della tensione di alimentazione, pone in risalto alcune problematiche legate ai componenti che costituiscono il gruppo stesso ed alle implicazioni della normativa in merito all'inserimento in rete di tali dispositivi. Nel seguito, con particolare riferimento a gruppi a doppia conversione capaci di garantire le migliori prestazioni in termini di compensazione dei disturbi di reti quali buchi ed interruzioni, vengono riportate alcune note relative a tali problematiche.

- **Inserimento in rete**

Come accennato in precedenza, in merito all'inserimento in rete dei gruppi di continuità, la norma CEI 11-20 che, nel prevedere per tali dispositivi un comportamento assimilabile ad un carico passivo, richiede l'intervento di un dispositivo di interfaccia nel caso di guasti o funzionamenti anomali che comportano erogazioni di energia. Tale funzione può essere assicurata da protezioni interne all'UPS che agiscono sul dispositivo statico o da protezioni ad esso associate, quali, come suggerito dalla norma stessa, una protezione direzionale di minima potenza a breve tempo di intervento.

- **Fattore di potenza**

La presenza di un raddrizzatore "totalmente controllato" a tiristori, per la regolazione della tensione lato continua, comporta normalmente per i gruppi statici valori bassi del fattore di potenza ($0,7 \div 0,85$) richiedendo quindi un adeguato rifasamento. Una possibile soluzione è quella di non operare più la conversione ca/cc con ponti a tiristori ma con ponti a diodi a cui associare, lato continua, un chopper per la regolazione della tensione.

- **Inquinamento armonico della rete**

Nel funzionamento normale in presenza della rete primaria di alimentazione il gruppo statico di continuità rappresenta per la rete un carico che inietta in rete correnti armoniche causa di distorsioni sulla tensione di alimentazione. Tali distorsioni, funzione dell'impedenza di rete, possono incidere sul funzionamento di altri carichi derivati e costituire un problema critico nel caso in cui venga previsto un funzionamento del gruppo statico con gruppi elettrogeni di soccorso. La circolazione di correnti armoniche può inoltre innescare fenomeni di risonanza in relazione alla presenza di batterie di condensatori per il rifasamento di cui il gruppo necessita.

Possibili azioni correttive per il contenimento dell'immissione in rete di correnti armoniche, sono essenzialmente quelle già viste al par.5.2.3, ovvero:

- impiego di filtri LC accordati sulle frequenze delle principali armoniche generate dal gruppo; un adeguato dimensionamento può consentire anche un rifasamento del gruppo stesso;
- realizzazione di un ponte dodecafase mediante due ponti esafase le cui tensioni di alimentazione presentano uno sfasamento di 30° elettrici grazie, ad esempio, all'impiego di un trasformatore di ingresso a tre avvolgimenti.

• Sovraccarico e corto circuiti

Nel caso in cui si debbano alimentare carichi con elevate correnti di avviamento o, in generale, in caso di sovraccarichi e corto circuiti, la necessità di limitare le correnti erogabili da un UPS può comportare problemi di avviamento del carico o di selettività delle protezioni del sistema di distribuzione a valle²¹. Come visto tali problemi possono essere superati con la commutazione da inverter alla rete primaria di alimentazione o di soccorso, da realizzare mediante l'adozione di un by-pass statico che deve essere in grado di sopportare tali sovracorrenti evitando il sovradimensionamento dell'inverter.

L'efficienza di questa soluzione risulta tuttavia compromessa qualora, in assenza di una rete di soccorso, vi sia un'interruzione nella rete primaria. Anche nel caso di presenza della rete di soccorso occorre comunque verificare la corrente di corto circuito che il gruppo di soccorso è in grado di fornire, al fine di garantire la tempestiva apertura della protezione in partenza alla linea interessata dal sovraccarico o dal corto circuito.

In alcuni casi, una soluzione, economicamente più onerosa, può essere quella di sfruttare il funzionamento di più gruppi statici in parallelo con un frazionamento delle partenze dell'impianto di distribuzione a valle e quindi un sovradimensionamento del gruppo complessivo (FIG.9-5). L'eliminazione del guasto, per effetto dell'intervento selettivo della protezione, comporta una perturbazione della tensione di uscita della durata necessaria alla separazione della linea guasta.

²¹ L'entità della corrente erogabile dal dispositivo è funzione della durata del sovraccarico (decescente con l'aumentare di quest'ultima). Tipicamente la corrente massima erogabile è limitata a valori pari $1,5 \div 2 I_n$, anche se i moderni UPS possono arrivare ad erogare correnti pari a $4 I_n$ per 100 ms (durata per la quale un commutatore statico può "garantire" correnti dell'ordine di $10 \div 15 I_n$ in funzione della potenza del dispositivo).

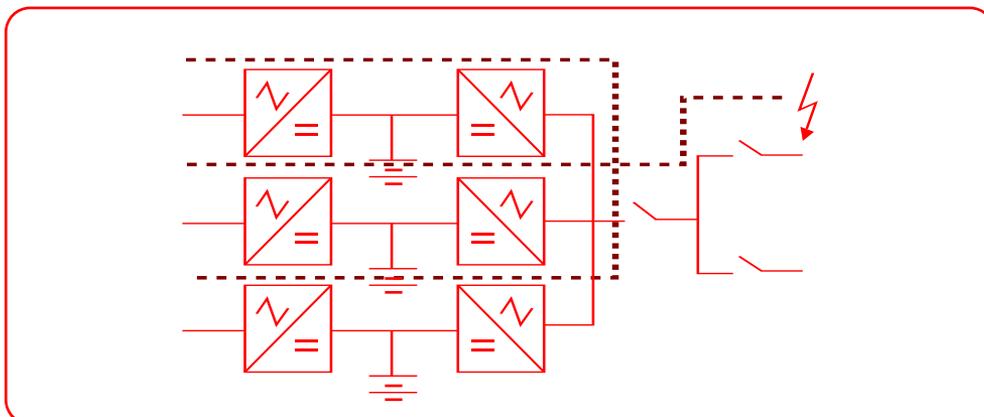


FIG. 9-5 | Selettività da UPS e frazionamento delle partenze dell'impianto di distribuzione a valle

• Tensione d'uscita verso il carico protetto

Relativamente alla qualità della tensione d'uscita fornita al carico dai gruppi statici il problema è essenzialmente legato al tipo di componenti utilizzati per l'inverter (in particolare alla frequenza di commutazione delle valvole) ed alla eventuale presenza di un carico "privilegiato" distortore. Tali aspetti possono essere mitigati dall'adozione di opportune tecniche di modulazione e di filtri di uscita.

Le problematiche evidenziate in relazione al fattore di potenza ed all'inquinamento armonico della rete possono essere ridimensionate nel caso di impiego di gruppi con stadio raddrizzatore a commutazione forzata che, a fronte di un maggior costo del gruppo di continuità, consente di ottenere correnti lato rete con notevoli riduzioni del contenuto armonico e dell'assorbimento di reattivo (correnti in fase con la tensione di rete).

9.1.2 Gruppi di continuità rotanti ed ibridi

Gli UPS rotanti e ibridi sono riservati ad applicazioni di media o grande potenza, a causa della loro maggiore complessità rispetto agli equivalenti statici. Le soluzioni variano notevolmente da caso a caso, in base a diversi fattori, tra cui:

- caratteristiche del carico, quali corrente di corto circuito e di avviamento richieste;
- presenza di dispositivi ausiliari, quali stadi di accumulo a batteria, convertitori di frequenza o accoppiamenti elettromagnetici sull'asse;
- numero di assi in rotazione (di solito non più di due).

Si possono solo identificare alcuni elementi comuni per la maggior parte delle soluzioni:

- almeno una massa rotante ad elevata inerzia e a bassissimo attrito (volano) che costituisce l'elemento di accumulo,
- un motore/generatore sincrono accoppiato al volano che sostiene la tensione durante il disturbo sull'alimentazione e tiene la massa in movimento²².

Nelle strutture più tradizionali (**FIG.9-6**) durante il funzionamento normale la tensione al carico privilegiato viene regolata dalla macchina sincrona, (operante come motore sincrono, con funzioni anche da compensatore rotante di potenza reattiva e da filtro armonico) e dall'induttanza L. Durante il manifestarsi del disturbo in rete, il dispositivo di interfaccia (DI) si apre e la macchina sincrona, funzionante come generatore sincrono mantenuto in sincronismo da un opportuno accoppiamento elettromagnetico durante la decelerazione del volano, alimenta direttamente il carico. Qualora sia previsto l'accoppiamento con un motore primo, l'autonomia del gruppo aumenterebbe da quella tipica di un volano (dell'ordine di 1 s) a quella della fonte di energia esterna.

In altre configurazioni il gruppo rotante è accoppiato ad un raddrizzatore e può sostituire la batteria di accumulatori in uno schema tipo UPS on-line, con il carico alimentato dall'inverter. Per quanto riguarda i gruppi di continuità ibridi, un esempio può essere costituito dalla cascata di uno stadio statico on-line e da un motore-generatore sincrono (**FIG.9-7**). Tale complicazione è giustificata dalla maggiore corrente di corto circuito e minore distorsione armonica che si può ottenere rispetto ad un UPS statico tradizionale, e dai minori problemi di sincronizzazione rispetto ad un gruppo rotante.

Durante il funzionamento normale la tensione di rete via UPS statica alimenta il motore sincrono (M) che a sua volta aziona il generatore sincrono (G) alimentante il carico privilegiato (al fine di aumentare il rendimento e diminuire gli ingombri, il motore ed il generatore sincrono sono ricavati in un'unica macchina rotante). Il ramo con l'interruttore statico e l'induttanza di disaccoppiamento dalla rete serve ad aumentare l'affidabilità del sistema ed il rendimento: in condizioni normali di rete il carico viene, infatti, alimentato da tale ramo evitando la doppia conversione realizzata dall'UPS statica, in cui transiterebbe solo una minima parte dell'energia. Un collegamento di tale ramo a valle della macchina rotante ((2) di **FIG.9-7**) eliminerebbe anche le perdite della macchina rotante che verrebbe a lavorare praticamente a vuoto. In caso di guasto in rete, l'induttanza L limita la corrente del generatore verso la rete, limitando il buco di

²² Talvolta il motore/generatore è sostituito da un gruppo alternatore/motore a induzione.

tensione trasferito al carico per il tempo necessario all'apertura dell'interruttore statico ed al passaggio al funzionamento in isola del carico, alimentato dal generatore stesso.

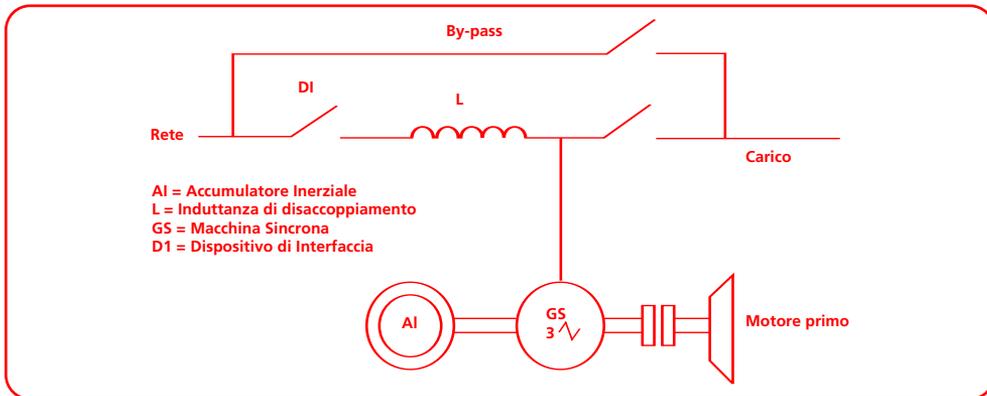


FIG. 9-6 | Schema di principio di un gruppo di continuità rotante con accumulatore inerziale (volano) e motore primo

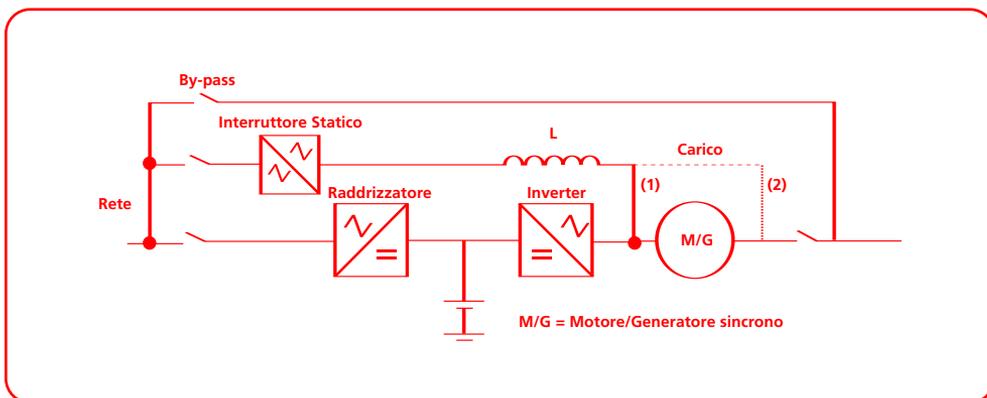


FIG. 9-7 | Schema di principio di un gruppo di continuità ibrido

9.2 Trasformatori Ferrorisonanti (CVTS Constant Voltage Transformers)

Uno schema di massima della struttura dei CVT è mostrato in FIG.9-8 e comprende un avvolgimento primario, tre secondari ed un condensatore. Sono trasformatori con rapporto spire unitario e garantiscono, grazie alla particolare caratteristica di magnetizzazione ed allo

schema realizzativo, una tensione di uscita scarsamente influenzata dalle variazioni della tensione in ingresso. Un trasformatore ferrorisonante deve essere sovradimensionato rispetto alla potenza del carico "protetto": tipicamente la potenza di dimensionamento è pari a circa quattro volte la potenza del carico al quale è associato il trasformatore per far fronte a correnti di inserzione, armoniche e per essere efficiente nel compensare i buchi di tensione. Infatti, all'aumentare del carico diminuisce la capacità di "sostenere" la tensione durante i buchi di tensione: ad esempio, con un carico del 25% rispetto alla potenza del trasformatore, sono compensati buchi di tensione con profondità sino al 70% della tensione nominale di rete, mentre con carico pari al 150% della potenza del trasformatore (condizioni di sovraccarico) la tensione in uscita risulta nulla anche in presenza della piena tensione di rete.

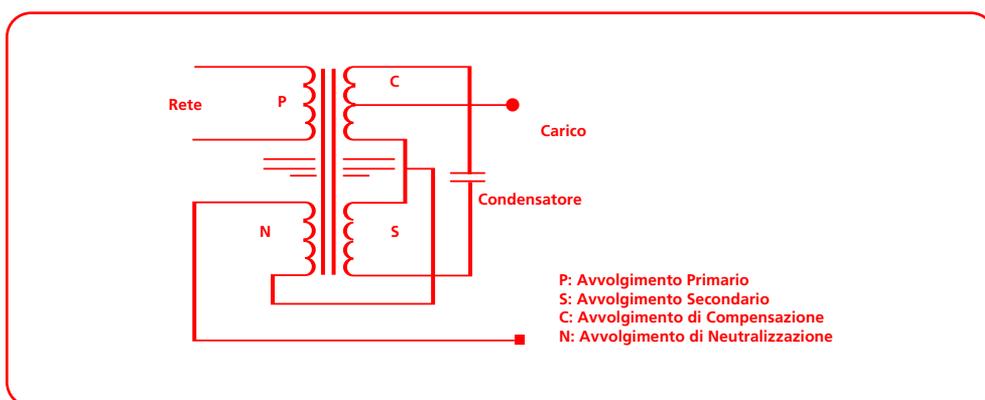


FIG. 9-8 | Schema del trasformatore ferrorisonante a tensione costante

I CVT sono dispositivi monofase e raggiungono potenze massime dell'ordine di 10 kVA.

In FIG.9-9 è riportato il confronto fra le curve di suscettibilità con e senza trasformatore ferrorisonante in comparazione con la curva dello standard CBEMA. La presenza del trasformatore garantisce insensibilità alle variazioni di tensione dell'apparecchiatura analizzata (controllore di processo) per buchi di ampiezza fino al 70%, mentre la stessa apparecchiatura presenta un comportamento non conforme per buchi di appena il 20% di V_n .

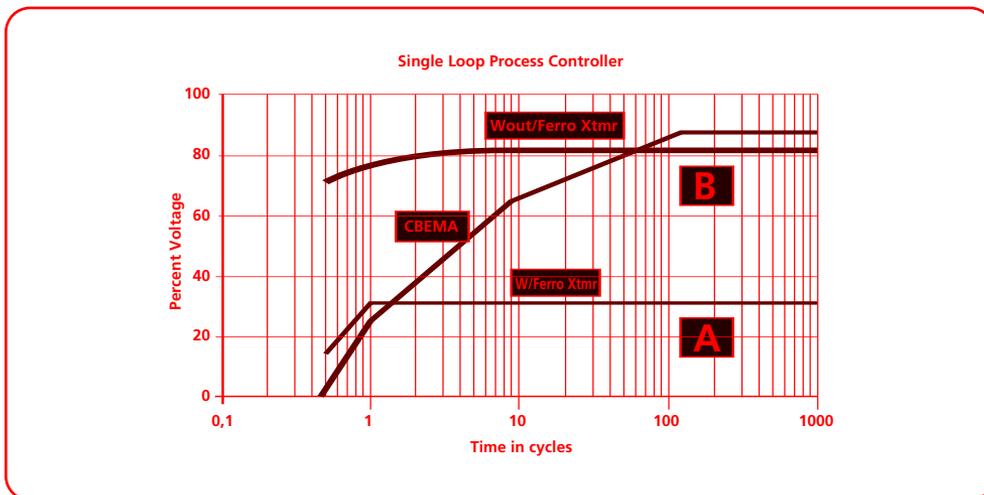


FIG. 9-9 Miglioramento della caratteristica di suscettibilità mediante l'utilizzo di trasformatori ferrorisonanti: con (A) e senza (B) trasformatore

9.3 Installazione di dispositivi innovativi basati sull'elettronica di potenza per la compensazione dei disturbi

Accanto ai tradizionali UPS, in commercio da molti anni, sono stati realizzati nuovi dispositivi innovativi, per basse e medie potenze sia in Media che in Bassa Tensione, basati sull'elettronica di potenza ed in grado di offrire una serie di funzioni aggiuntive rispetto ai tradizionali gruppi di continuità, da cui si differenziano anche in termini di impatto sulla rete.

In generale, infatti, questi dispositivi, denominati Custom Power (specie nel caso di applicazioni in Media Tensione²³), oltre ad essere in grado di offrire una mitigazione dei disturbi di rete per carichi/processi sensibili, consentono di ridurre l'impatto che molti carichi hanno sulla qualità dell'alimentazione stessa, in quanto "generatori di disturbi" (armoniche, flicker, variazioni di tensione, squilibri, ecc.).

Le funzioni che un dispositivo Custom Power è in grado di realizzare sono dipendenti dalla configurazione di potenza e dalla logica di controllo del dispositivo stesso e possono essere ricondotte a:

²² Nel caso di applicazioni in Bassa Tensione, tali dispositivi sono normalmente denominati "filtri attivi" in senso lato (power conditioning), in grado di apportare benefici sia al carico (stabilità della tensione) sia alla rete (operando da filtro per le armoniche, condizionatore di potenza attiva e reattiva ecc.). Possono essere di tipologia "derivata", "serie" o "ibrida", in combinazione con filtri passivi risonanti.

- miglioramento della qualità della tensione per carichi particolarmente sensibili ai disturbi di rete (compensazione di buchi di tensione, interruzioni, tensioni distorte e/o squilibri);
- riduzione dell'impatto di carichi disturbanti sulla rete del Distributore (compensazione di armoniche, flicker, squilibri, reattivo);
- compensazione delle variazioni rapide di potenza attiva (peak-shaving);
- interfaccia per generazione distribuita (migliore utilizzazione dell'energia);
- regolazione della tensione su lunghe linee o, più in generale, su aree poco magliate di reti di distribuzione (miglioramento dell'utilizzazione della rete).

Compatibilmente con la configurazione ed il controllo del dispositivo, alcune delle precedenti funzioni possono anche essere realizzate in contemporanea da una stessa apparecchiatura. Ad esempio, come risulta dalla **TAB.9-1**, in cui viene riportata una sintesi delle principali caratteristiche e potenzialità di diversi dispositivi, un D-STATCOM (Distribution Statcom) oltre alle funzioni di regolazione reattivo, flicker ed armoniche, può essere in grado di compensare anche i disturbi di rete se dotato di un accumulo e di un interruttore statico per la rapida separazione dalla rete stessa.

Riprendendo quanto illustrato nella **TAB.9-1**, si riporta una ripartizione delle apparecchiature per "funzione":

- riduzione dell'impatto in rete di carichi disturbanti, regolazione della tensione su lunghe linee, peak-shaving ed interfaccia per generazione distribuita:
 - D-STATCOM (Distribution Statcom).
- mitigazione degli effetti dei disturbi di rete su carichi sensibili:
 - DVR (Dynamic Voltage Restorer);
 - S-DVR (Step Dynamic Voltage Restorer)
 - SVR (Static Voltage Restorer);
 - SCB e STS (Static Circuit Breaker e Static Transfer Switch);
 - UPFC (Unified Power Flow Controller);
 - D-STATCOM + Static Circuit Breaker;
 - Dispositivo derivato con reattanza serie di disaccoppiamento.

In **FIG.9-10** si riporta lo schema di principio dei vari dispositivi Custom Power (CUSPO). Occorre evidenziare come allo stato attuale l'impiego di questi dispositivi sia principalmente legato ad applicazioni "puntuali" e mirate presso utenze particolarmente sensibili ai disturbi di rete (principalmente per mitigare buchi di tensione) o disturbanti (compensazione del flicker), dove valutazioni economiche di costi-benefici ne hanno giustificato l'adozione, anche in considerazione degli attuali costi di installazione relativamente alti e non ancora, evidentemente, contenuti da un effetto di economia di scala.

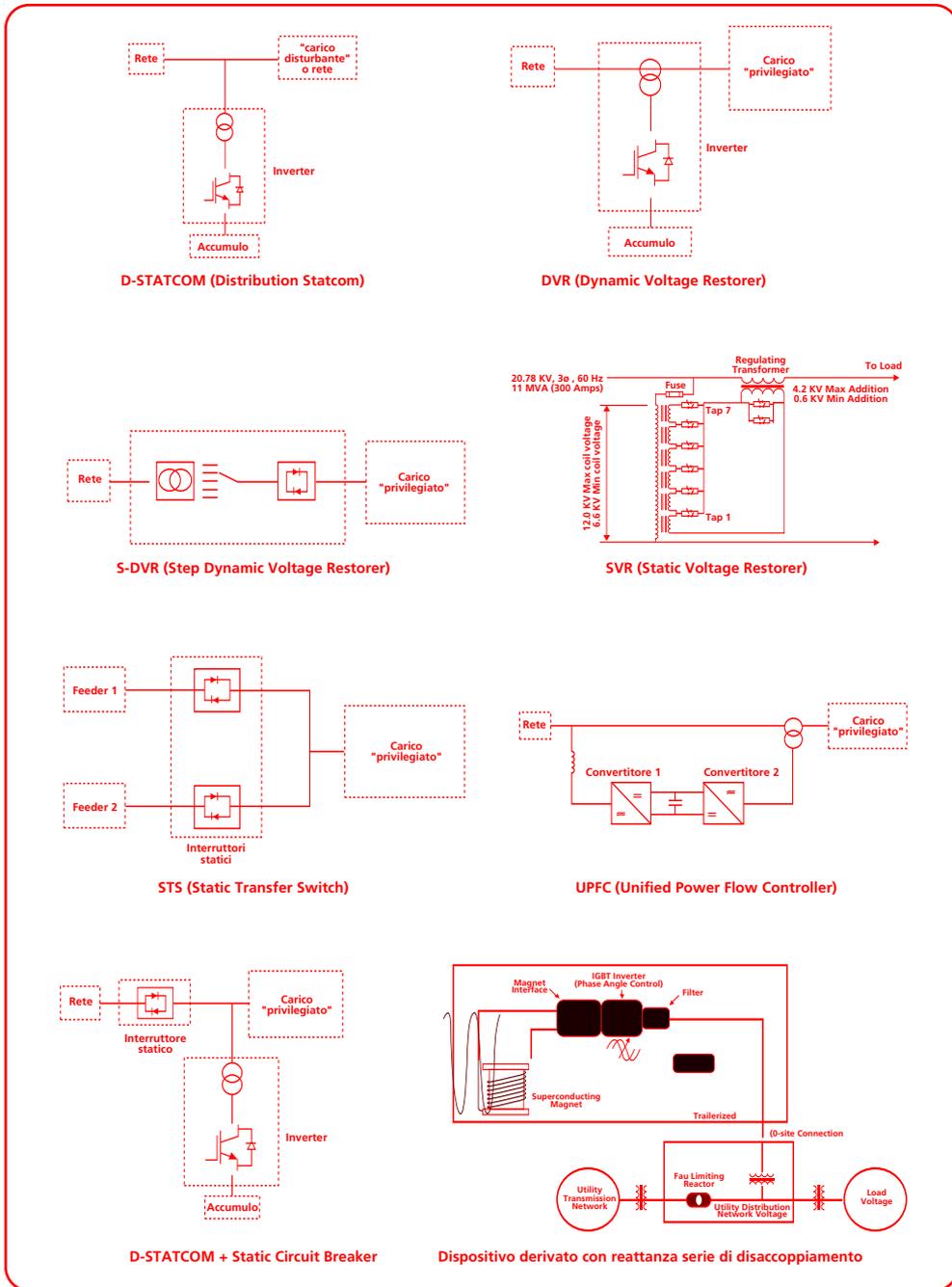


FIG. 9-10 | Schema di principio delle principali tipologie di dispositivi Custom Power

TAB. 9-1 Funzioni realizzabili dai diversi dispositivi Custom Power

	Buchi di tensione	Interruzioni	Regolaz. P (peak Shaving)	Regolaz. Q e $\cos\phi$	Compens. Armoniche I-Carico (fil attivo)	Compens. Armoniche V-Rete (fil attivo)	Compens. Flicker	Livello Tensione	Range potenze	Schema inserzione	Accumulo di energia
D-STATCOM	No	No	Si (se dotato di accumulo adeguato)	Si	No 1)	No	Si	MT e BT (anche AT)	Fino a decine di MVA	Tipo parallelo	Basso
DVR	Si	No	No	No	No 1)	No	No	MT e BT	Fino ad una decina di MVA	Tipo serie	Medio basso
S-DVR	Si	No	No	No	No	No	No	MT ed AT	Fino a decine di MVA	Tipo serie	-----
SVR	Si	No	No	No	No	No	No	MT	Fino a decine di MVA	Misto serie parallelo	-----
UPFC	Si	No	No	Si	No 1)	No 1)	Si	MT e BT	Fino a pochi MVA	Misto serie parallelo	Basso
D-STATCOM + STATIC SWITCH	Si	Si	Si (se dotato di accumulo adeguato)	Si	No 1)	No 1)	Si	MT e BT	Fino ad una decina di MVA	Misto serie parallelo	Medio – alto
STATIC TRANSFER SWITCH (2)	Si	Si	No	No	No	No	No	MT e BT	Per reti MT/bt	Tipo serie	-----
Dispositivi derivato con reattanza disaccoppiamento	Si	No	Si (se dotato di accumulo adeguato)	Si	No 1)	No	Si	MT e BT	Fino ad una decina di MVA	Misto serie parallelo	Medio – alto

(1) Possibile per potenze non troppo elevate, che consentono l'utilizzo di componenti elettronici con frequenze di commutazione adeguate.

(2) Il dispositivo è applicabile ad installazioni con doppia alimentazione indipendente

APPENDICE A

Caratteristiche della tensione fornita dalle reti pubbliche di distribuzione

Le caratteristiche della tensione fornita dalle reti pubbliche di distribuzione in Media e Bassa Tensione sono definite, per condizioni normali di esercizio, dalla norma CEI EN 50160 (par.4.1.1) relativamente le caratteristiche della tensione riguardanti:

- frequenza;
- ampiezza;
- forma d'onda;
- simmetria delle tensioni trifase.

Nella **TAB.A-1** sono riportate le principali caratteristiche della tensione evidenziando i fenomeni che possono influenzarle, mentre, a titolo di esempio, la **FIG.A-1** illustra i diversi tipi di variazione di ampiezza della tensione dovuti a fenomeni transitori ed impulsivi.

Una sintesi relativa all'origine dei disturbi e dei loro effetti è riportata in **TAB.A-2** (un'analisi più approfondita è riportata nell'Appendice C).

TAB. A-1 Caratteristiche della tensione

Caratteristica	Fenomeno	
	Tipo	Descrizione
Frequenza	Variazione	Scostamento dal valore nominale
Ampiezza	Variazione della tensione	Aumento o diminuzione della tensione
	Variazione rapida della tensione	Variazione rapida singola del valore efficace della tensione tra due livelli consecutivi mantenuti per durate definite ma non specificate
	Fluttuazione	Serie di variazioni di tensione o una variazione ciclica dell'involuppo di una tensione
	Sovratensioni	Innalzamenti della tensione misurati in valore assoluto istantaneo o in p.u. del valore nominale. Possono essere temporanee (di durata relativamente lunga) o transitorie (con durata di pochi millisecondi o inferiore)
	Buchi	Abbassamenti parziali compresi tra il 90% e l'1% della tensione dichiarata, seguiti da un ripristino dopo un breve periodo di tempo. Durata convenzionale compresa tra 10 ms e 60 s
	Interruzioni brevi	Abbassamenti della tensione al di sotto dell'1% della tensione dichiarata per una durata fino a 180 ms
	Interruzioni lunghe	Abbassamenti della tensione al di sotto dell'1% della tensione dichiarata per una durata maggiore di 180 ms
Forma d'onda	Armoniche ed interarmoniche	Deformazione della forma sinusoidale per effetto di componenti di tensione sinusoidale a frequenza multiplo intero (armoniche) della fondamentale o di componenti a frequenza non multiplo intero (interarmoniche) della fondamentale della tensione di alimentazione
Simmetria del sistema trifase	Squilibrio di tensione	Disuniformità dei valori efficaci delle tensioni di fase e/o degli angoli di fase tra fasi consecutive

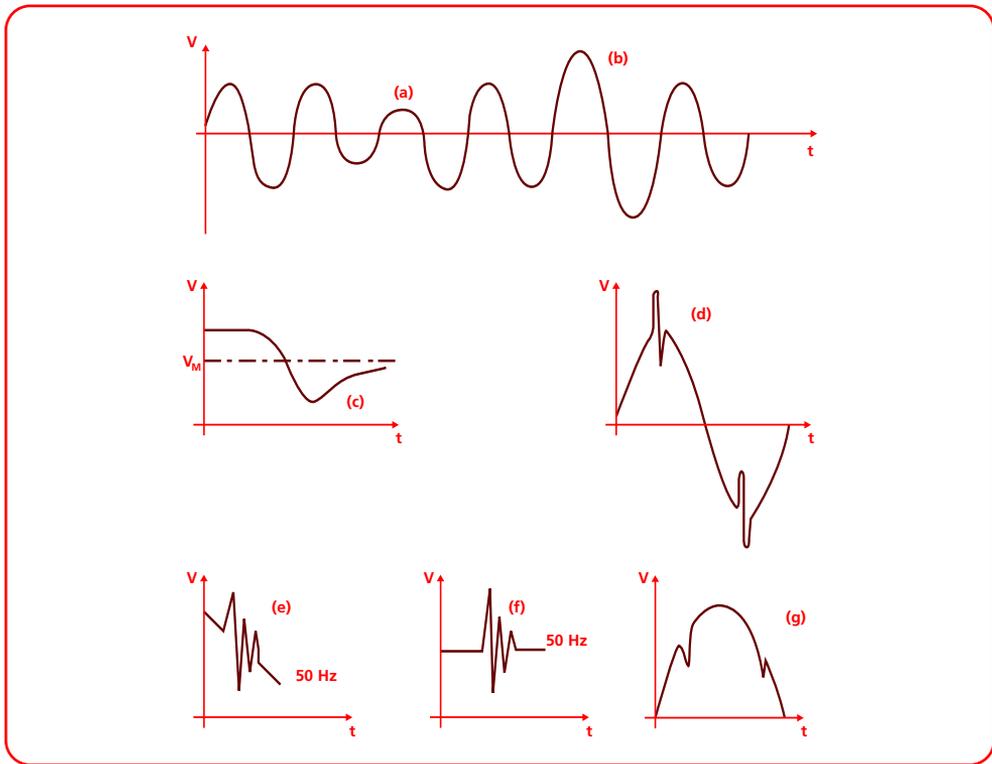


FIG. A-1 Schematizzazione della tipologia di variazione dell'ampiezza della tensione

- (a) Buchi di tensione
- (b) Sovratensioni non impulsive
- (c) Variazioni lente
- (d) Sovratensioni impulsive di lunga durata
- (e) Sovratensioni impulsive di media durata
- (f) Sovratensioni impulsive di breve durata
- (g) Transitori di commutazione

TAB. A-2 Origine ed effetti dei disturbi

Disturbo	Origine	Effetti
Frequenza	Distacchi di gruppi di generatori. Commutazione di grossi carichi. Guasti.	Variazione di velocità nei motori. Malfunzionamento dei dispositivi elettronici che utilizzano la frequenza per generare la base dei tempi. Perdite nei lamierini magnetici. Influenza sull'efficacia dei filtri accordati per la "soppressione" delle armoniche.
Variazioni rapide di tensione	Inserzione di apparecchi. Carichi con assorbimento variabile.	Intervento intempestivo protezioni. Flicker (se ripetitive). Malfunzionamento di apparati elettronici.
Variazioni transitorie di tensione	Fulminazioni. Guasti. Manovre.	Perforazione di isolamenti. Danneggiamento circuiti elettronici.
Buchi ed interruzioni brevi	Guasti. Manovre.	Intervento di relè di minima tensione. Irregolarità di funzionamento di motori. Malfunzionamento di apparati elettronici digitali. Malfunzionamento di apparecchiature elettroniche. Spegnimento di lampade a scarica con ritardo di riaccensione.
Armoniche	Carichi non lineari. Azionamenti a velocità variabile. Lampade. Convertitori statici. Elettrodomestici. Forni ad arco. Saldatrici. Trasformatori. Motori.	Malfunzionamento di protezioni. Aumento perdite dielettriche. Aumento perdite nel rame di macchine e trasformatori. Aumento perdite in rete. Possibile danneggiamento condensatori. Errori di apparati di misura. Malfunzionamento di apparati elettronici. Funzionamento instabile di motori. Malfunzionamento dei convertitori. Interferenza sui circuiti di telecomunicazioni.
Squilibrio di tensione	Carichi squilibrati.	Comparsa di componenti di sequenza inversa della tensione con sovrariscaldamento di macchine rotanti e raddrizzatori.

Descrizione delle principali caratteristiche della tensione

Le definizioni ed i valori riportati nel seguito fanno riferimento alla **CEI EN 50160**. È opportuno ricordare che tale norma non è una "norma EMC" ma definisce e descrive i limiti e i valori massimi attesi entro cui gli utenti possono aspettarsi che rimangano contenute le caratteristiche della tensione fornita dalle reti pubbliche di distribuzione, caratteristiche che possono essere oltrepassate per il 5% di un determinato periodo di osservazione, ma che si riferiscono a tutti i terminali di consegna di una rete²⁴. Pertanto, per alcune caratteristiche della tensione, i valori forniti dalla **CEI EN 50160** sono più elevati dei livelli di compatibilità, poiché non si considera la possibilità che tali valori possano essere superati in alcuni punti della rete.

²⁴ Si ricorda che i livelli di compatibilità, fissati dalla normativa EMC, possono essere superati con il 5% di probabilità nel tempo e anche in punti della rete di alimentazione.

Frequenza

Le variazioni di frequenza sono scostamenti della frequenza di alimentazione dalla frequenza nominale della rete (50 Hz) e dipendono essenzialmente da eventi relativi al sistema di generazione e trasmissione ed in particolare:

- distacco di grossi gruppi generatori;
- applicazione di guasti in AAT e AT;
- apertura di linee di interconnessione "importanti";
- commutazione di grossi carichi.

La norma prevede una distinzione tra sistemi con interconnessione sincrona ai sistemi adiacenti e sistemi isolati più deboli ed in particolare, non riferimento al valore medio misurato in un intervallo di 10 secondi, le variazioni di frequenza indicate sono, per le reti sia MT sia BT:

- **sistemi con connessione sincrona ad un sistema interconnesso:** 50 Hz \pm 1% durante il 95% di un anno e 50 Hz +4% / -6% durante il 100% del tempo.
- **sistemi senza connessione sincrona ad un sistema interconnesso** (ad esempio, reti in operazione in isola): 50 Hz \pm 2%, per il 95% durante una settimana e 50 Hz \pm 15% durante il 100% del tempo;

Ampiezza della tensione di alimentazione

Corrisponde a:

- per reti BT alla tensione nominale pari a 230 V fase-neutro per sistemi trifase a 4 conduttori e a 230 V fase-fase per sistemi a 3 conduttori;
- per reti MT alla tensione dichiarata U_c , tensione pari normalmente alla nominale ma che, per ragioni contrattuali tra Cliente e distributore, può differire da quest'ultima.

Variazioni della tensione di alimentazione

In condizioni normali di esercizio, le variazioni di carico determinano delle variazioni della tensione media di alimentazione, compensate generalmente dalla regolazione automatica in poche decine di secondi. La norma prevede, escludendo le interruzioni di tensione:

- reti BT
 - durante qualsiasi periodo di una settimana il 95% dei valori efficaci della tensione di alimentazione, mediato nei 10 minuti, deve essere compreso in $U_N \pm 10\%$;
 - tutti i valori efficaci della tensione di alimentazione, mediati nei 10 minuti, devono essere compresi in $U_N +10\% / -15\%$;
- reti MT
 - durante qualsiasi periodo di una settimana il 95% dei valori efficaci della tensione di alimentazione, mediato nei 10 minuti, deve essere compreso in $U_c \pm 10\%$;

Variazioni rapide della tensione

Ampiezza delle variazioni rapide della tensione

Una variazione rapida della tensione è un abbassamento rapido del valore efficace della tensione fornita, per effetto delle variazioni di carico nelle installazioni o di manovre nel sistema. Per essere "visibile" una variazione rapida di carico richiede che questo ultimo abbia una potenza significativa rispetto alla potenza di corto circuito della rete di alimentazione al nodo di connessione del carico e normalmente si presenta con un iniziale brusco abbassamento, seguito da una rampa crescente terminante ad un valore di tensione inferiore a quello esistente prima della variazione di carico. Il fronte di discesa può avere durata anche di 10 ms, mentre la rampa di ripresa può durare diversi periodi della tensione di alimentazione.

Occorre sottolineare come una variazione rapida della tensione, per essere tale, non deve superare il limite inferiore di tolleranza della tensione ($U_N -10\%$), altrimenti verrebbe considerata un buco di tensione. Tipicamente le variazioni rapide hanno ampiezze non superiori al 5% della tensione nominale o dichiarata (il collegamento dei carichi in grado di determinarle è normalmente soggetto a regolamentazione) ma ampiezze superiori sino al 10% possono occasionalmente verificarsi (come, ad esempio, nel caso di aree rurali con lunghe linee di alimentazione). La norma prevede:

- reti BT ampiezze generalmente non superiori al 5% di U_N e variazioni, in talune circostanze, fino al 10% di U_N con una durata breve;
- reti MT ampiezze generalmente non superiori al 4% di U_C e variazioni, in talune circostanze, fino al 6% di U_C con una durata breve.

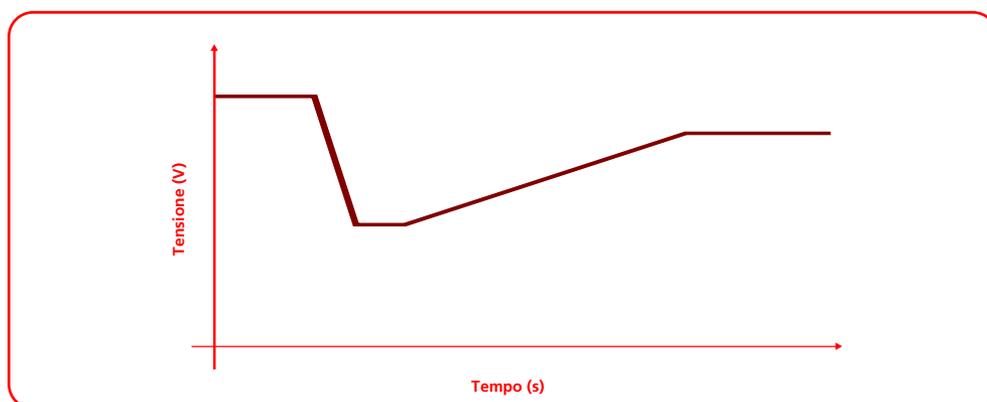


FIG. A-2 | Rappresentazione schematica di una variazione rapida di tensione

Il periodo di osservazione ed il limite della ripetitività non possono essere fissati in quanto troppo dipendenti dai casi specifici.

Severità di flicker

Il flicker è l'effetto prodotto sulla percezione visiva dalla variazione dell'intensità luminosa di lampade soggette a fluttuazioni della loro tensione di alimentazione, composte da una sequenza di variazioni rapide in intervalli di tempo tali da determinare la sensazione di flicker (tipicamente si tratta di fluttuazioni che presentano frequenze di modulazione del 50 Hz tra 0,5 e 35 Hz).

La severità del disturbo è valutata con i seguenti parametri:

- severità a breve termine (Pst) misurata a intervalli consecutivi di 10 minuti con strumentazione conforme alla norma CEI EN 61000-4-15 e variante;
- severità a lungo termine (Plt) valutata sulla base di una serie di 12 valori consecutivi di Pst corrispondenti ad un intervallo di due ore, mediante la seguente espressione:

$$P_{lt} = \sqrt[3]{\sum_{i=1}^{12} \frac{P_{sti}^3}{12}}$$

La norma indica solo il parametro Pst, ritenendo questa quantità più significativa per descrivere la tensione di alimentazione.

Le misure sono eseguite tra le fasi nelle reti MT e fase-terra nelle reti BT: la misura fondamentale è l'indicatore di severità a breve termine, di cui dovrebbero essere considerati solo i valori misurati nell'arco di tempo in cui l'ampiezza della tensione di alimentazione si mantiene nell'intervallo $\pm 10\%$ della tensione nominale o dichiarata e non è affetta da buchi di tensione. La conformità alla norma prevede valori di $P_{lt} < 1$ per il 95% del tempo di osservazione.

Buchi di tensione

Il buco di tensione, generalmente dovuto a guasti in rete o negli impianti dei clienti e, in qualche caso, alla commutazione di grossi carichi (tipicamente l'avvio di grossi motori), è definito come una riduzione improvvisa del valore efficace della tensione tra il 90% e l'1% del valore dichiarato U_C , riduzione seguita dal ritorno della tensione stessa, dopo un breve intervallo di tempo, ad un valore superiore al 90% U_C . Variazioni di tensione che non riducono la tensione a meno del 90% della tensione dichiarata non sono considerati buchi di tensione. La necessità di una misura pratica ha portato a definire il disturbo con riferimento alla tensione dichiarata piuttosto che a quella esistente al momento in cui si manifesta il disturbo: in tal

modo si assicura che una riduzione della tensione di alimentazione fino 0 V corrisponda ad una riduzione del 100%.

Convenzionalmente la durata di un buco di tensione è tra 10 ms (tempo minimo di valutazione del valore efficace) e 1 minuto (per includere gli effetti della commutazione in rete di grossi carichi induttivi, motori, e l'inserzione dei trasformatori).

Il buco di tensione è pertanto un disturbo "bidimensionale", definito sia dalla durata, sia dalla sua profondità definita come differenza tra la tensione minima durante il buco e la tensione nominale o dichiarata.

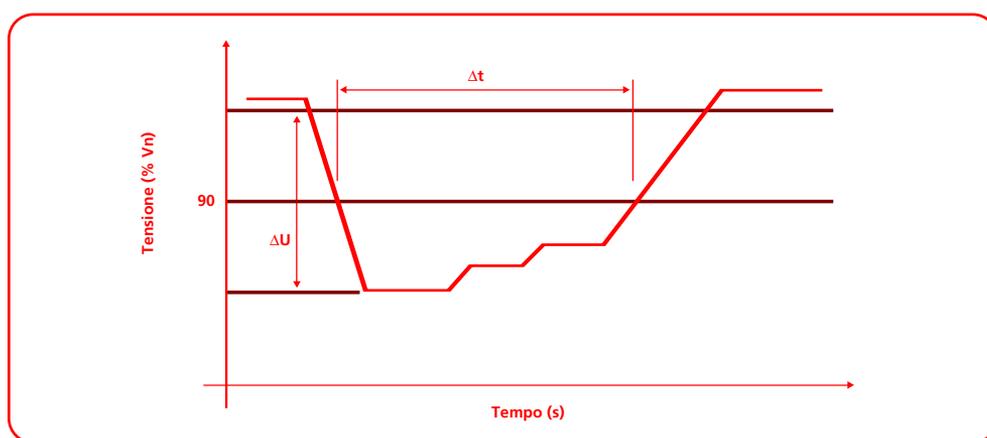


FIG. A-3 | Rappresentazione schematica di un buco di tensione

Un buco di tensione viene classificato come un evento, indipendente dalla sua forma e dal numero di fasi coinvolte e questo perché gran parte delle utenze industriali e commerciali ricevono un'alimentazione trifase ma anche installazioni monofase possono includere apparecchiature sensibili ai buchi di tensione.

Trattandosi di eventi imprevedibili ed ampiamente aleatori con frequenza annuale notevolmente variabile in funzione del tipo di sistema di alimentazione e del punto di osservazione, la norma ne fornisce solo dei valori indicativi.

In particolare la norma indica come la maggior parte dei buchi abbia durata inferiore a 1s e profondità minore del 60%, anche se buchi di profondità superiore e durata maggiore possono talvolta verificarsi. In certe aree (tipicamente quelle con reti deboli come quelle rurali) viene inoltre indicata la possibilità del verificarsi molto frequente di buchi di tensione con profondità tra il 10% ed il 15% di U_C a seguito delle commutazioni di carico negli impianti utilizzatori.

Questo spiega altresì il valore indicativo sulla numerosità attesa dei buchi di tensione che in un anno può variare da qualche decina “fino a un migliaio”. Occorre evidenziare che i valori indicativi riportati dalla norma **CEI EN 50160** si basano sui risultati di un indagine svolta da **UNIPEDA**²⁵, mediante una campagna di misura durata 3 anni per una migliore caratterizzazione dei buchi di tensione nelle reti MT europee, risultati riportati nella seguente tabella:

TAB. A-3 Indagine UNIPEDA sulle caratteristiche dei buchi di tensione: frequenza annua con probabilità del 95% di non essere superata

Ampiezza (% della UN)		Durata					
		(ms)	(ms)	(s)	(s)	(s)	(s)
Da	A meno di	10 < 100	100 < 500	0,5 < 1	1 < 3	3 < 20	20 < 60
10	30 (*)	111	68	12	6	1	0
30	60	13	38	5	1	0	0
60	99	12	20	4	2	1	0
99	100	1	12	16	3	3	4

(*) UNIPEDA DISDIP ha deciso, per future indagini, di dividere questa classe in due classi: 10 - 15 e 15 - 30%

Benché l’indagine UNIPEDA fornisca un’idea più precisa relativamente alle caratteristiche dei buchi di tensione, i distributori possono fornire normalmente solo informazioni qualitative sulla situazione del disturbo in particolari aree della rete, informazioni basate sull’esperienza. Tuttavia, nel caso di installazioni con carichi o processi industriali sensibili ai buchi di tensione, ove siano richieste informazioni più precise sulla frequenza e severità del disturbo, un’indagine in sito più dettagliata deve essere condotta.

Interruzioni brevi e lunghe della tensione

Contrariamente alla normativa EMC²⁶ e alla stessa UNIPEDA, le quali citano un limite superiore di 1 minuto relativo alle sole interruzioni brevi, la CEI EN 50160 oltre a suddividere le interruzioni della tensione in programmate (dovute a lavori programmati nella rete di distribuzione e di cui i clienti sono avvisati) e accidentali (dovute a guasti transitori o permanenti legati ad eventi esterni, guasti di apparecchiature o ad interferenze di terzi), prevede per queste ultime un’ulteriore suddivisione in:

²⁵ Indagine condotta dal gruppo di esperti DISDIP.

²⁶ IEC/TR 61000-2-1: Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 2: Environment - Section 1: Description of the environment - Electromagnetic environments for low frequency conducted disturbances and signalling in public power supply systems”.

- interruzioni brevi, con durata fino a 3 minuti;
- interruzioni lunghe, con durata maggiore di 3 minuti.

Questa classificazione prende in esame le caratteristiche di protezione e dei sistemi di richiusura automatica utilizzati nelle reti di distribuzione.

Normalmente, infatti, sulle linee in Media Tensione sono previsti cicli di richiusura rapida (con ritardi alla richiusura che possono variare tra 300 e 500 ms e, in gran parte, inferiori al secondo) e, nel caso questa fallisse con guasto che si ripresenta alla richiusura dell'interruttore di linea, di richiusura lenta (con ritardo che comunemente varia tra i 30s ed i 3 minuti). Qualora a valle della richiusura dell'interruttore il guasto non venisse eliminato (guasto permanente) si verificherebbe l'apertura definitiva dell'interruttore. In alcuni casi sono previste anche sequenze automatiche dei tronchi di linea affetti a guasto, effettuando una serie di manovre in linea per isolare, il più rapidamente possibile, il tronco di linea guasto e rialimentare i tronchi sani.

Occorre evidenziare che queste tecniche, benché possano tradursi in interruzioni brevi per i clienti alimentati dalla linea affetta da guasti ed in buchi di tensione "aggiuntivi" per quelli alimentati dalle linee sane alimentate dalla stessa sbarra della linea guasta, sono adottate al fine di migliorare il più possibile la continuità dell'alimentazione e di ridurre il numero di clienti sottoposti ad un'interruzione dovuta ad un guasto permanente (interruzione lunga).

Poiché la norma CEI EN 50160 considera la protezione e le procedure di ripristino dell'alimentazione una caratteristica intrinseca dell'esercizio normale del sistema elettrico, la durata delle interruzioni brevi è stata aumentata a 3 minuti anziché 1 minuto come nella normativa EMC. D'altra parte, dal punto di vista del Cliente, l'apertura di un interruttore seguita da un ciclo di richiusura automatica, rapida e lenta, è praticamente equivalente ad un'interruzione continua, rendendo più significativo il considerare la sequenza dei singoli eventi di "apertura e richiusura" come un unico evento equivalente caratterizzato da una durata pari al tempo intercorso tra l'apertura iniziale dell'interruttore e l'operazione di richiusura finale.

Relativamente alla rete BT si evidenzia come la possibilità di autoestinguerne un guasto con la sua disalimentazione è molto bassa e pertanto l'apertura dell'interruttore di rete è definitiva ed il guasto è sempre permanente. In generale i clienti BT risentono pertanto degli eventi che interessano sia la linea MT a cui sono collegate le loro linee di alimentazione, sia quelli che si verificano sulle linee BT appartenenti alla medesima sbarra.

Anche le interruzioni sono caratteristiche per le quali, data la loro aleatorietà ed imprevedibilità (specie per quelle accidentali soggette ad azioni di terzi ed alle condizioni atmosferiche), la

norma fornisce solo valori indicativi ed in particolare, sia per le reti BT sia per quelle MT:

- brevi interruzioni - il numero annuale può variare da qualche decina a parecchie centinaia; la durata di circa il 70% delle interruzioni brevi può essere inferiore a 1 s;
- lunghe interruzioni - la frequenza annuale può essere meno di 10 o fino a 50, a seconda della zona.

Per le interruzioni programmate non vengono forniti dati essendo comunicate in anticipo²⁷. È importante sottolineare che, in ogni caso, la continuità dell'alimentazione dipende molto anche dalle installazioni del Cliente e dalla apparecchiature ivi utilizzate, dato che carenze di manutenzione o non adeguato isolamento delle stesse influiranno significativamente sul tutto il sistema di alimentazione, aumentando il numero di guasti, sia transitori sia permanenti.

Sovratensioni temporanee a frequenza di rete tra fasi e terra

Sono essenzialmente sovratensioni alla frequenza di rete e si manifestano durante guasti nel sistema di distribuzione pubblica o all'interno di un impianto utilizzatore e scompaiono all'eliminazione del guasto.

Reti in Bassa Tensione

I sistemi di distribuzione pubblica in BT sono, per la maggior parte, eserciti con neutro messo efficacemente a terra, soluzione che tende a limitare le sovratensioni temporanee fase-terra originate da guasti a terra che si manifestano nel sistema MT a monte. Normalmente la sovratensione può raggiungere il valore della tensione fase-fase a causa dello spostamento del punto di neutro del sistema di tensione trifase. La durata delle sovratensioni è limitata dalla circolazione della corrente di guasto e quindi dal tempo di intervento delle protezioni e di apertura dell'interruttore. In alcune situazioni, indicativamente, l'ampiezza della sovratensione è generalmente inferiore a 1,5 kV.

Reti in Media Tensione

Gli eventi che causano sovratensioni temporanee nelle reti in Media Tensione sono essenzialmente i guasti monofase ed i fenomeni di ferrorisonanza.

Nel caso di guasti a terra, in sistemi a neutro isolato o messo a terra tramite impedenza, sovratensioni temporanee si manifestano tra le fasi sane e la terra che si protraggono per tutta la durata del guasto.

²⁷ Sebbene la norma non fornisca nessun livello di riferimento (ma solo valori indicativi di frequenza) riguardante le interruzioni lunghe, i distributori devono tenere conto anche di eventuali livelli imposti dall'Autorità per l'Energia Elettrica e il Gas.

Relativamente ai fenomeni di ferrorisonanza, dovuti alla saturazione dei nuclei magnetici, le sovratensioni, conseguenti non sono alla frequenza di rete ma sono caratterizzate da forte distorsione per la presenza di componenti armoniche e subarmoniche variabili da pochi Hz fino a 150 Hz.

In pratica, due sono le principali cause di questo tipo di sovratensione nelle reti MT:

- apertura di conduttori
- presenza di riduttori di tensione nelle reti a neutro isolato.

Nel primo caso si è in presenza di uno o due conduttori aperti per effetto, ad esempio, di rottura o intervento di fusibili, che continuano ad essere alimentati dalla fase sana "via" primario di un trasformatore MT/BT (con avvolgimento a triangolo o con neutro isolato) in condizioni di basso carico. L'ampiezza massima della sovratensione fase-terra varia tra 2,5 - 3 p.u. della tensione nominale ed ha forma d'onda distorta (componenti armoniche sino 150 Hz). Tale sovratensione appare solo sulla linea interessata dalla condizione di conduttore aperto.

Nel secondo caso, la sovratensione fase-terra si manifesta a seguito di un improvviso cambiamento della rete, come a seguito presenza ed estinzione di guasti o manovre di esercizio. L'ampiezza massima della sovratensione fase-terra varia tra 1,8 - 2,5 p.u. della tensione nominale ed ha forma d'onda distorta da subarmoniche o armoniche (da pochi Hz sino 150 Hz). Tale sovratensione non influenza la tensione concatenata fase-fase.

I fenomeni di ferrorisonanza rappresentano un fenomeno "raro" se paragonato ai guasti monofase verso terra.

Benché rientranti nelle caratteristiche della tensione per le quali la norma non specifica dei valori definiti, in relazione al valore atteso delle sovratensioni temporanee, dipendente dallo stato del neutro del sistema, la norma indica che in sistemi con neutro messo a terra, rigidamente o tramite impedenza (tipicamente resistenza di valore molto basso), l'ampiezza delle sovratensione non deve superare il valore di $1,7 U_C$, mentre in sistemi con neutro isolato o messo a terra con circuito risonante ("bobina di Petersen") non deve superare generalmente $2,0 U_C$.

La modalità di esercizio dello stato del neutro deve essere indicato dal Distributore.

Sovratensioni transitorie tra fasi e terra

Le sovratensioni transitorie sono fenomeni oscillatori o non oscillatori di breve durata e di solito molto smorzati, caratterizzate da fronti di salita rapidi che possono variare da meno di 1 ms fino a pochi microsecondi. Sono normalmente dovute a fulminazioni, a manovre in rete o ad interventi di fusibili, presentano caratteristiche molto differenti e potrebbero essere classificate in base all'ampiezza, frequenza di comparsa, durata, frequenza principale d'onda, velocità di variazione della tensione e contenuto energetico. Una suddivisione in base alla durata, consente di identificare:

- sovratensioni di lunga durata ($> 100 \mu\text{s}$);
- sovratensioni di media durata (da $1 \mu\text{s}$ sino a $100 \mu\text{s}$);
- sovratensioni di breve durata ($< 1 \mu\text{s}$).

Anche le sovratensioni transitorie rappresentano caratteristiche della tensione per le quali la norma non specifica dei valori definiti.

Relativamente ai sistemi in Bassa Tensione le sovratensioni transitorie generalmente non superano i 6 kV ed il loro contenuto energetico varia notevolmente in funzione della origine²⁸. Normalmente, qualora le apparecchiature d'utenza siano realizzate per sopportare le sovratensioni transitorie, in accordo con la norma **CEI EN 60664-1**²⁹, ciò sarebbe sufficiente a garantire il superamento della sovratensione transitoria nella maggior parte dei casi. Tuttavia, se necessario, gli eventuali dispositivi di protezione delle sovratensioni negli impianti utilizzatori dovrebbero essere scelti tenendo conto delle più severe sovratensioni (in modo da includere quelle indotte da fulminazioni e da manovra).

Per quanto riguarda le reti in Media Tensione, la norma indica come il coordinamento dell'isolamento nell'installazione del Cliente debba essere compatibile con quello del fornitore di energia.

Squilibrio della tensione trifase

È caratterizzato, per effetto principalmente di uno squilibrio del carico, da una perdita della simmetria, in ampiezza e sfasamento, dei vettori delle tensioni di fase, condizione che implica la presenza di componenti di sequenza inversa.

²⁸ Confrontando sovratensioni indotte da fulminazione e di manovra si evidenzia come, benché le prime siano di ampiezza maggiore, presentano un contenuto energetico minore, essendo di durata inferiore.

²⁹ **CEI EN 60664-1**: "Coordinamento dell'isolamento per le apparecchiature nei sistemi a Bassa Tensione. Parte 1: Principi, prescrizioni e prove"

Il rapporto fra la componente di sequenza inversa U_i e quella di sequenza diretta U_d è detto "grado di squilibrio".

La conformità alla norma avviene quando, durante qualunque periodo di una settimana, il 95% dei valori medi efficaci, calcolati su 10 minuti, della componente U_i della tensione di alimentazione sarà compreso tra 0 e 2% della componente U_d . In alcune aree possono essere attesi squilibri sino al 3%.

La norma si riferisce solo alla sequenza inversa della tensione essendo quella più significativa per le possibili interferenze sulle apparecchiature allacciate al sistema ed i valori indicati sono adatti per considerare gli effetti degli squilibri sul medio o lungo termine (per esempio gli effetti termici).

Tensioni armoniche

Benché la norma definisca le tensioni armoniche in rapporto alla tensione nominale, i valori forniti per le reti BT e per quelle MT sono riferiti rispettivamente alla tensione nominale e a quella dichiarata e non alla fondamentale, come normale nella prassi comune, seguita anche da diverse normative.

Poiché molti strumenti di misura forniscono i valori percentuali delle armoniche con riferimento alla componente fondamentale della tensione, è necessario applicare un fattore di conversione ad ogni misura delle armoniche prima di confrontarne il valore con quelli riportati nella norma (in pratica il coefficiente di correzione sarà quasi sempre molto vicino all'unità).

I valori delle armoniche sono specificati solo fino alla 25a armonica dato che sia, le ampiezze degli ordini superiori sono così piccole da risultare praticamente di difficile misurazione, sia a causa della difficoltà di dare valori validi per tutte le reti.

Le armoniche sono valutate sia individualmente, mediante la loro ampiezza, sia globalmente attraverso il fattore di distorsione totale THD³⁰, valutato come:

$$\mathcal{D}_t = \sqrt{\sum_{h=2}^{40} V_h^2} \cdot 100 \quad (\%)$$

³⁰ La limitazione posta al 40° ordine è convenzionale.

Alcune armoniche possono subire un processo di amplificazione, soprattutto in condizioni di basso carico, in alcuni punti della rete dove si manifestano condizioni di **risonanza**.

Le armoniche della tensione di alimentazione sono dovute principalmente a carichi non lineari connessi a tutti i livelli di tensione del sistema di alimentazione: le correnti armoniche circolanti nelle impedenze di rete contribuiscono ad accrescere le tensioni armoniche. Correnti armoniche, impedenze di rete e conseguentemente le tensioni armoniche variano nel tempo.

La conformità alla norma si ha quando, durante qualunque periodo di una settimana, il 95% dei valori efficaci di ogni tensione armonica, mediati su 10 minuti, è minore o uguale ai valori indicati nelle due tabelle seguenti per le reti in Bassa e in Media Tensione. Relativamente al valore THD%, questo deve essere minore o uguale all'8% per entrambi i livelli di tensione.

TAB. A-4 Valori delle tensioni armoniche singole ai terminali di alimentazione BT, espressi in % di U_N

Armoniche dispari non multiple di 3		Armoniche dispari multiple di 3		Armoniche pari	
h	Tensione relativa (%)	h	Tensione relativa (%)	h	Tensione relativa (%)
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1,5	4	1
11	3,5	15	0,5	6 ... 24	0,5
13	3	21	0,5		
17	2				
19	1,5				
23	1,5				
25	(*)				

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

TAB. A-5 Valori delle tensioni armoniche singole ai terminali di alimentazione MT, espressi in % di U_C

Armoniche dispari non multiple di 3		Armoniche dispari multiple di 3		Armoniche pari	
h	Tensione relativa (%)	h	Tensione relativa (%)	h	Tensione relativa (%)
5	6	3	5 (*)	2	2
7	5	9	1,5	4	1
11	3,5	15	0,5	6 ... 24	0,5
13	3	21	0,5		
17	2				
19	1,5				
23	1,5				
25	1,5 (**)				

(*) In funzione del tipo della rete il valore della terza armonica può essere sostanzialmente minore.

(**) I valori corrispondenti alle armoniche di ordine superiore a 25 non sono indicati poiché sono generalmente piccoli ma imprevedibili a causa degli effetti di risonanza.

Tensioni interarmoniche

Livelli normalizzati per le interarmoniche in rete sono ancora allo studio in attesa di acquisire maggiore esperienza sul fenomeno, anche se la diffusione del disturbo in rete è in crescita per effetto dello sviluppo di convertitori di frequenza o carichi simili. Le caratteristiche della strumentazione di misura corrispondono, in pratica, a quelle impiegate per le armoniche. Interarmoniche a frequenze prossime alla fondamentale possono originare flicker ed in alcuni casi interferiscono con i sistemi a controllo di ondulazione.

Trasmissione di segnali sulla rete di alimentazione

In generale, in relazione ai segnali sovrapposti alla tensione di alimentazione per la trasmissione di informazioni nella rete pubblica di alimentazione e negli impianti utilizzatori, occorre distinguere tra:

- segnali a controllo di ondulazione d'onda, segnali sinusoidali con frequenze comprese tra 110 Hz a 3 kHz;
- segnali trasmessi sulla rete ("onde convogliate"), segnali sinusoidali nella banda di frequenza che va da 3 a 148,5 kHz;
- segnali marcatori di rete, alterazioni transitorie sovrapposte in punti specifici della forma d'onda di tensione.

I livelli sono definiti ugualmente per le reti in Bassa e Media Tensione, nel campo di frequenze 100 Hz ÷ 9 kHz; per frequenze superiori a 9 kHz ed inferiori a 95 kHz, la norma non fornisce livelli per le reti MT per mancanza di esperienza. La conformità alla norma si ha quando il valore di tensione dei segnali trasmessi, mediato su 3 s, è, nel 99% di un giorno, minore o uguale ai valori della figura seguente:

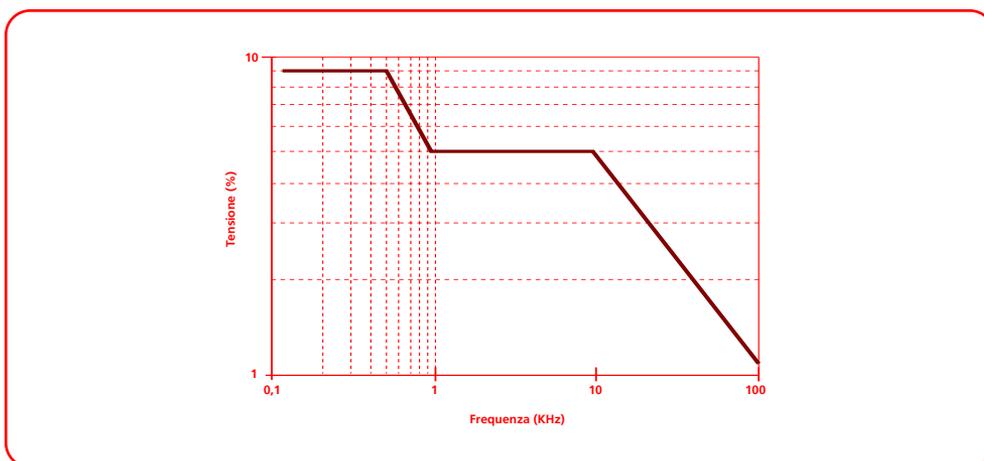


FIG. A-4 Livelli di tensione, in % di UN (reti BT) o di UC (reti MT) dei segnali di frequenza usati nel sistema di distribuzione pubblica



Per la Bassa Tensione, la banda di frequenza $95 \text{ Hz} \div 148,5 \text{ kHz}$ è riservata per il funzionamento dei sistemi/apparecchiature di comunicazione esclusivamente negli impianti utilizzatori. Nonostante, in generale, l'uso della rete pubblica di Bassa Tensione non sia permesso per la trasmissione di segnali tra clienti, tensioni con frequenze rientranti nel suddetto campo di variazione devono essere considerate nella rete pubblica, con un livello fino a 1,4 V efficaci. Al fine di evitare possibili interferenze reciproche di installazioni per la trasmissione di segnali tra loro vicine, se necessario, deve essere prevista da parte del Cliente, nelle proprie installazioni, appropriati provvedimenti di immunizzazione o protezioni contro tali interferenze.

Relativamente alla rete pubblica in Media Tensione, si assume che i clienti non sono abilitati ad utilizzare tale rete per la trasmissione di segnali.

APPENDICE B

Livelli di compatibilità per la rete industriale

Si riportano nel seguito, **TAB.B-1** e **TAB.B-2**, i livelli di compatibilità per reti industriali e non pubbliche, a tensioni nominali sino a 35 kV (Bassa e Media Tensione), secondo quanto definito nella norma **CEI EN 61000-2-4**: Compatibilità elettromagnetica (EMC) Parte 2-4: Ambiente - Livelli di compatibilità per disturbi condotti in bassa frequenza negli impianti industriali.

I livelli di compatibilità fanno riferimento alle tre classi di ambiente elettromagnetico definite nella normativa e riportate nel Cap. 3:

- i livelli relativi alla classe 1 si applicano solitamente alla rete in Bassa Tensione;
- i livelli relativi alla classe 2 sono solitamente identici a quelli della rete pubblica;
- i livelli relativi alla classe 3 coprono i possibili disturbi in ambiente industriale.

La descrizione dell'ambiente elettromagnetico in ambito industriale non è per ora prevista per la rete AT.

TAB.B-1: Livelli di compatibilità per reti industriali e non pubbliche

Disturbo	Classe 1	Classe 2	Classe 3
Variazione della frequenza di rete: Δf (a)	± 1 Hz	± 1 Hz	± 1 Hz
Valori limite della tensione: $\Delta U_N/U_N$	$\pm 8\%$	$\pm 10\%$ (b)	da $+10\%$ a -15% (c)
Sbilanciamento di tensione: U_{reg}/U_{pos}	2%	2%	3%

(a) ± 2 Hz nel caso di reti isolate

(b) Valore non definito nella CEI EN 61000-2-2

(c) Sono previste variazioni di tensione che forniscono tensioni di alimentazione nella gamma da $0,85 U_C$ ³¹ a $0,9 U_C$ per una durata non maggiore di 60 s. Per durate maggiori si applica la gamma da $0,9 U_C$ a $1,1 U_C$.

³¹ La tensione U_C è la cosiddetta tensione di alimentazione dichiarata ed è una tensione pari normalmente alla nominale ma che, per ragioni contrattuali tra Cliente e Distributore, può differire da quest'ultima (CEI EN 50160).

TAB.B-2 Livelli di compatibilità per le singole armoniche di tensione e per la distorsione armonica totale nelle reti industriali e non pubbliche

Armoniche dispari non multiple di tre (h)	Classe 1 Uh (%)	Classe 2 Uh (%)	Classe 3 Uh (%)
5	3	6	8
7	3	5	7
11	3	3,5	5
13	3	3	4,5
17	2	2	4
17 <..£ 49	$2,27 \times (17/h) - 0,27$	$2,27 \times (17/h) - 0,27$	$4,5 \times (17/h) - 0,5$
Armoniche dispari non multiple di tre (h)	Classe 1 Uh (%)	Classe 2 Uh (%)	Classe 3 Uh (%)
3	3	5	6
9	1,5	1,5	2,5
15	0,3	0,4	2
21	0,2	0,3	1,75
21 <..≤ 45	0,2	0,2	1
Armoniche pari (h)	Classe 1 Uh (%)	Classe 2 Uh (%)	Classe 3 Uh (%)
2	2	2	3
4	1	1	1,5
6	0,5	0,5	1
8	0,5	0,5	1
10	0,5	0,5	1
10 <..≤ 50	$0,25 \times (10/h) + 0,25$	$0,25 \times (10/h) + 0,25$	1
	Classe 1 THD (%)	Classe 2 THD (%)	Classe 3 THD (%)
Distorsione armonica totale	5	8	10

Nota: In certi casi in cui una parte di una rete industriale è dedicata a carichi importanti non lineari, i livelli di compatibilità di classe 3 per quella parte di rete possono essere 1,2 volte i valori sopra indicati. In tali casi si dovrebbero prendere delle precauzioni per quanto riguarda l'immunità delle apparecchiature ad essa collegata. Tuttavia, per i PCC (rete pubblica) hanno precedenza i livelli di compatibilità della CEI EN 61000-2-2 e della CEI EN 61000-2-12.

Interarmoniche: La norma fornisce livelli di compatibilità solo nel caso di una tensione interarmonica che si presenti ad una frequenza vicina a quella fondamentale, risultante in una modulazione di ampiezza della tensione di alimentazione, condizione che in alcuni carichi, specialmente i dispositivi di illuminazione, origina un flicker. In tal caso il livello di compatibilità, espresso come rapporto tra l'ampiezza della tensione interarmonica e quella della fondamentale, è rappresentato dalla curva di FIG.B-1 in funzione della frequenza di battimento

(differenza tra le frequenze delle due tensioni, interarmonica e fondamentale, presenti simultaneamente). Il livello di compatibilità si basa su un livello di flicker di $P_{st} = 1$ per lampade che funzionano a 120 V e 230 V, ed è applicabile solo a circuiti con dispositivi di illuminazione.

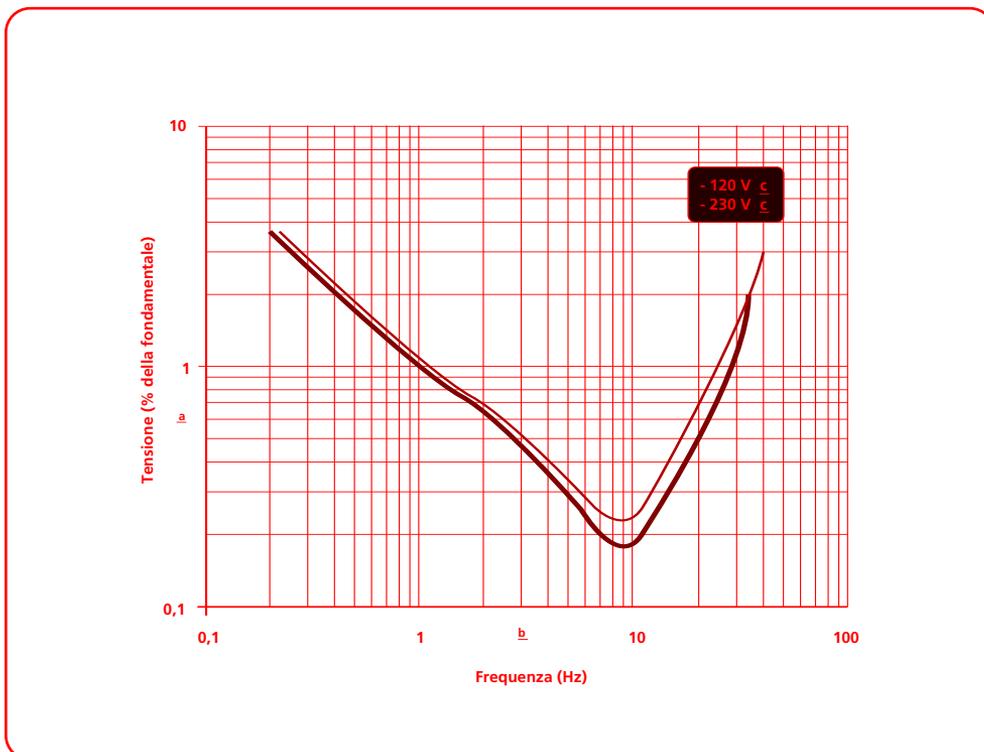


FIG. B-1 | Livello di compatibilità per tensioni interarmoniche secondo la CEI EN 61000-2-4

- a: Ampiezza dell'interarmonica (% della fondamentale)
- b: Frequenza di battimento con la frequenza fondamentale (Hz)
- c: Lampada

APPENDICE C

Origine ed effetti dei disturbi

Variazioni della frequenza

Il distacco di grossi gruppi generatori o la commutazione di carichi molto importanti, danno luogo a variazioni transitorie della frequenza, compensate in tempi relativamente rapidi (qualche secondo) dalla regolazione sui motori primi dei gruppi generatori. Successivamente le potenze di scambio tra reti interconnesse vengono riequilibrate dalle centrali preposte alla regolazione secondaria frequenza-potenza. La regolazione frequenza-potenza provvede ad annullare il valor medio degli scatti di potenza trasferita tra reti interconnesse a seguito delle variazioni di frequenza.

La frequenza di rete influenza il comportamento dei motori, che variano di velocità e le prestazioni dei dispositivi elettronici che la utilizzano per generare la propria base dei tempi, oltre che le perdite nei lamierini magnetici e l'efficacia dei filtri accordati impiegati per la soppressione delle armoniche.

Variazioni lente della tensione

Le variazioni lente della tensione sono dovute alle variazioni del carico e controllate per mezzo di variatori installati sui trasformatori di iniezione AAT/ AT, variatori sui trasformatori AT /MT comandati da regolatori automatici e prese a vuoto sui trasformatori MT /BT.

Variazioni rapide della tensione

Le variazioni rapide della tensione sono generalmente prodotte dalla commutazione dei carichi e, a seconda della loro ampiezza, possono determinare malfunzionamento di relè, teleruttori e apparati elettronici.

Le fluttuazioni di tensione (variazioni rapide di tensione ripetitive) sono prodotte dalla commutazione di carichi a funzionamento intermittente (per esempio motori, saldatrici) e da carichi industriali con assorbimento di potenza variabile nel tempo (per esempio forni ad arco). Le lampade a incandescenza sono le più sensibili, in quanto in termini percentuali una variazione nella tensione di alimentazione causa una variazione di intensità luminosa più di tre volte maggiore.

Il livello di sensazione istantanea di flicker è una funzione quadratica dell'ampiezza della variazione luminosa e quindi della fluttuazione di tensione che la genera.

Sovratensioni temporanee e transitorie

Le sovratensioni presentano caratteristiche molto variabili ed è possibile classificarle in temporanee (per lo più a frequenza industriale) e transitorie, a loro volta caratterizzate in base alla durata in:

- a) sovratensioni di lunga durata ($>100 \mu\text{s}$), in genere con andamento oscillatorio smorzato e frequenza inferiore ai 10 kHz;
- b) sovratensioni di media durata (1- 100 μs), di tipo oscillatorio smorzato, con frequenze da 10 a 1000 kHz, oppure unidirezionale, con e senza oscillazioni;
- c) sovratensioni di breve durata ($<1 \mu\text{s}$), con frequenze di oscillazione dell'ordine di decine di MHz.

Nel seguito si riportano le sovratensioni presenti nelle reti MT e BT.

Reti MT

Nelle reti MT si riscontrano i seguenti fenomeni tipici di sovratensioni.

- Sovratensioni temporanee dovute a ferrorisonanza: sono fenomeni oscillatori con valori di picco pari a 2,5-3,5 p.u. e frequenza di involuppo di qualche Hz, provocati tipicamente da trasformatori di tensione induttivi, con durata anche molto lunga.
- Sovratensioni temporanee dovute a guasti monofase a terra: nelle reti MT con neutro isolato o a terra tramite impedenza, questo tipo di guasto può produrre delle sovratensioni tra fase e terra sulle fasi sane. La loro ampiezza, in genere, è inferiore a 2 p.u. della tensione nominale fase-terra; tali sovratensioni si protraggono per tutta la durata del guasto.
- Sovratensioni transitorie di lunga durata conseguenti a manovre o guasti o trasferite dall'alta tensione, con ampiezze massime dell'ordine di 3÷5 p.u.; il loro valore effettivo è comunque limitato dai livelli protettivi adottati sulla rete (scaricatori e/o spinterometri), per assicurare il coordinamento dell'isolamento.
- Sovratensioni di media durata dovute a scariche atmosferiche e alla riaccensione di interruttori. Le massime ampiezze di queste sollecitazioni possono superare la tenuta degli isolamenti di linea aerea; nelle cabine AT/MT e sui trasformatori MT/BT il loro valore effettivo è limitato da scaricatori e/o spinterometri, come nel caso precedente. La forma d'onda è generalmente di tipo unidirezionale e in alcuni casi unidirezionale/oscillatoria (tempi di fronte compresi fra il ms e la cinquantina di ms, tempo di coda dell'ordine di centinaia di ms). Per le linee aeree di distribuzione la maggior parte di queste sollecitazioni è di tipo indotto (fulminazioni in vicinanza della linea), mentre più rare sono quelle di tipo diretto (scariche sui pali o sui conduttori).

- Sovratensioni di breve durata che possono verificarsi a seguito di manovre in impianti di tipo blindato in SF6 (ampiezza generalmente fino a poche volte il valore di picco della tensione nominale, forma d'onda oscillatoria con frequenza superiore a 1 MHz).

Reti BT

Per le reti BT le sovratensioni tipiche possono essere così descritte:

- Sovratensioni di lunga durata originate da:
 - interventi di fusibili (generalmente con ampiezze fino a 1-2 kV);
 - manovre di banchi di condensatori (generalmente con ampiezze fino a 2-3 volte il valore di picco della tensione nominale);
 - trasferimento di transitori dalla rete MT, attraverso i trasformatori MT/BT, per accoppiamento induttivo (generalmente con ampiezze fino a 1 kV).
- Sovratensioni di media durata, dovute a:
 - manovre di organi di interruzione, lato BT (generalmente con ampiezze fino a diverse volte la tensione nominale);
 - trasferimento di sovratensioni atmosferiche dalla MT attraverso i trasformatori MT /BT, per accoppiamento capacitivo (generalmente con ampiezze fino a 4-6 kV);
 - fulminazioni diretta ed indiretta delle linee BT (ampiezze fino a qualche decina di kV).
- Sovratensioni di breve durata, causate da:
 - manovre su brevi tratti di cavo o su sistemi di sbarre, interruzioni di correnti induttive ecc. (generalmente con ampiezze fino a 1-2 kV);
 - manovre (chiusura ed apertura) di relé e contattori che danno una successioni di spegnimenti e riaccensioni.
- Sovratensioni temporanee (limitate dalla messa a terra efficace del neutro) derivate da guasti o dall'inserimento di banchi di condensatori (generalmente con ampiezze al di sotto di 1,5 kV).

Buchi di tensione e interruzioni brevi

Origine

I buchi di tensione e le interruzioni brevi sono fenomeni sempre presenti nelle reti elettriche e sono prodotti principalmente da:

- guasti (sia sulla linea di alimentazione del Cliente che sulle linee limitrofe metallicamente connesse alla linea in esame), seguiti da manovre di richiusura automatica rapida o lenta;
- correnti d'inserimento di trasformatori e condensatori (buchi di tensione di notevole ampiezza e durate non superiori a 0,5 secondi);
- carichi che variano rapidamente e forti correnti di spunto dei motori.

Le cause dei guasti in ordine di importanza sono le seguenti:

- atmosferiche (fulminazioni, vento, neve, ghiaccio)
- inquinamento salino, nelle zone esposte a venti dal mare
- contatto di fronde o rami con conduttori di linee aeree
- scariche provocate da uccelli e piccoli animali
- irrigazione a pioggia e fertirrigazione
- inquinamento industriale in condizioni di alta umidità o debole pioggia, dopo periodi di tempo secco.

Anche se la maggior parte dei buchi di tensione ha origine sulla rete di distribuzione, una sensibile percentuale dei buchi di tensione e interruzioni brevi dipende dal sistema di trasmissione (nel nostro caso il sistema europeo) e dagli impianti dei Clienti.

Anche in presenza di impianti del Distributore e del Cliente adeguatamente coordinati e allineati ai migliori standard tecnologici, è comunque prevedibile la presenza di un numero fisiologico di interruzioni e buchi di tensione. A titolo indicativo per la distribuzione dei buchi di tensione, nell'Appendice A, è riportata la distribuzione risultata dalla campagna di misura svolta da **UNIPEDE**, per una migliore caratterizzazione dei buchi di tensione nelle reti MT europee.

In tale contesto, si inserisce l'attività, promossa dall'AEEG e condotta da CESI nell'ambito delle risorse assegnate alla Ricerca di Sistema, di realizzazione di un sistema di monitoraggio della qualità della tensione sulle reti di distribuzione in Media Tensione. L'AEEG ha inoltre proposto che un numero, necessariamente limitato, di clienti finali possano avere l'opportunità di partecipare alla campagna di monitoraggio e quindi di conoscere i livelli effettivi di qualità nel proprio nodo di alimentazione.

L'opportunità offerta ai clienti che aderiscono all'iniziativa risulta rilevante anche sotto il profilo informativo e contrattuale, dal momento che i clienti partecipanti avranno a disposizione tutte le misure effettuate dal proprio strumento nel corso della campagna di monitoraggio. Queste misure potranno essere utilizzate in seguito ai fini della stipula dei contratti per la qualità previsti, su base di accordi volontari tra clienti e Enti di distribuzione, dall'AEEG.

La rete AT è esercita con il neutro a terra ed è dotata di protezioni distanziometriche che isolano un tronco sede di guasto in tempi variabili tra 0,1 e 1 secondo, in base al gradino di intervento e di richiusura automatica tripolare o uni-tripolare. In alcuni casi la richiusura tripolare è effettuata manualmente dopo qualche minuto.



Un guasto sulla rete AT produce un buco di tensione avvertibile su tutta la rete alimentata dalle sbarre su cui è attestata la linea affetta, che viene sezionata automaticamente dalle protezioni poste agli estremi del tronco sede del guasto stesso, tra due cabine AT/MT contigue.

Se la manovra di richiusura non ha successo, si origina un secondo buco di tensione, seguito da una interruzione per il tempo necessario a effettuare la rialimentazione della cabina rimasta isolata.

Sulla rete MT, la casistica dei guasti è più varia, in quanto i guasti monofase e quelli polifase sono controllati da protezioni diverse e le linee sono dotate di dispositivi di richiusura automatica rapida e lenta. Occorre ricordare che, relativamente alla modalità di esercizio della rete MT, in Italia, specialmente nelle reti gestite da Enel Distribuzione, si sta procedendo in un programma di conversione della modalità di gestione del neutro da isolato a compensato³² con conseguente adeguamento delle protezioni sia di rete sia dell'impianto dei clienti in virtù della diversa modalità di riconoscimento dei guasti monofasi a terra in reti a neutro compensato rispetto a neutro isolato. La "compensazione" del neutro consente di aumentare la probabilità di autoestinzione dei guasti monofase, evitando l'apertura dell'interruttore di linea con conseguente riduzione del numero di interruzioni per Cliente, e di facilitare il dimensionamento degli impianti di terra delle cabine MT/BT. Anche se in misura minore, l'esercizio con neutro compensato comporta anche una riduzione del numero di interruzioni a seguito di guasti polifasi.

La **TAB. C-1** riporta una classificazione dei tipi di guasto mentre la **TAB. C-2** indica le durate approssimate delle interruzioni brevi e dei buchi di tensione per "guasti diretti", che interessano la linea di alimentazione del Cliente e "guasti indiretti", che interessano linee metallicamente connesse alla linea suddetta.

Il numero di buchi di tensione e interruzioni brevi dipende dal numero e tipo di guasti attesi (ad esempio condizioni climatiche, livello ceraunico ecc.), dal tipo di rete, dalla percentuale di cavo nella rete di trasmissione e distribuzione ecc..

³² Nell'esercizio a neutro compensato, il neutro è messo a terra attraverso reattanza od impedenza (resistenza più reattanza) allo scopo di limitare, per effetto della compensazione della capacità verso terra delle linee mediante la "bobina", la corrente di guasto monofase a terra.

TAB. C-1 Classificazione dei tipi di guasto

Tipo di guasto		Descrizione
MONOFASE (contatto tra fase e terra)	Autoestinguente	Estinzione spontanea entro il tempo di intervento delle protezioni di rete
	Transitorio	Estinzione a seguito della richiusura rapida
POLIFASE (contatto tra due o tre fasi)	Semipermanente	Estinzione a seguito della richiusura lenta
	Permanente	Persiste anche a seguito di manovre di richiusura essendosi creata una condizione irreversibile

TAB.C-2 Caratteristiche di buchi di tensione e interruzioni in reti MT

GUAUSTO			Conseguenza sulla tensione di alimentazione del cliente
Localizzazione	Tipo	Persistenza	
GUAUSTO DIRETTO (sulla linea di alimentazione del Cliente)	MONOFASE	Autoestinguente	Nessuna
		Transitorio	Interruzione pari al tempo di attesa alla richiusura rapida (*)
		Semipermanente	Interruzione pari al tempo di attesa alla richiusura rapida e lenta (*)
		Permanente	Interruzione pari al tempo di attesa alla richiusura rapida e lenta e del tempo di riparazione (*)
	POLIFASE	Autoestinguente	Buco di tensione <100 ms (**)
		Transitorio	Buco di tensione <100 ms ed interruzione pari al tempo di attesa alla richiusura rapida
		Semipermanente	Buco di tensione <100 ms ed interruzione pari al tempo di attesa alla richiusura rapida e lenta
		Permanente	Buco di tensione <100 ms ed interruzione pari al tempo di attesa alla richiusura rapida e lenta e del tempo di riparazione
GUAUSTO INDIRETTO (su linee limitrofe metallicamente connesse con quella alimentazione del Cliente)	MONOFASE	Qualsiasi	Nessuna
	POLIFASE	Autoestinguente	Buco di tensione <100 ms (**)
		Transitorio	Buco di tensione di 100 ms
		Semipermanente	2 Buchi di tensione di 100 ms
		Permanente	3 Buchi di tensione di 100 ms

(*) Oltre ai tempi di attesa delle richiusure rapida e lenta, occorre considerare i tempi di intervento delle protezioni e di manovra degli interruttori.

(**) Tempo indicativo equivalente ai tempi di intervento delle protezioni e di manovra degli interruttori.

Effetti

I buchi di tensione e le interruzioni brevi sono la causa più frequente di problemi connessi alla qualità della fornitura: possono comportare interventi intempestivi dei relè di minima tensione, dei teleruttori, irregolarità nel funzionamento dei motori, malfunzionamenti di apparati elettronici digitali e di dispositivi elettronici di potenza, spegnimento di lampade a scarica con ritardo di riaccensione ecc..

Le conseguenze dei buchi di tensione e delle interruzioni brevi sono molto variabili, a seconda del tipo della tipologia degli impianti elettrici e delle singole apparecchiature, nonché del processo produttivo e in particolare del grado di integrazione dell'automazione, oltre che delle modalità di utilizzo degli altri vettori energetici (aria, vapore, acqua).

Un caso particolare è costituito dagli **impianti di illuminazione** con lampade a scarica (in particolare lampade al sodio ad alta pressione e lampade al mercurio), che possono spegnersi anche per abbassamenti di tensione modesti (dell'ordine del 30%-40%) e di breve durata (50 ms) e richiedono per riaccendersi tempi dell'ordine di qualche minuto.

Per quanto riguarda i **motori asincroni** un buco o una interruzione breve producono un rallentamento e, al ripristino della tensione, la coppia corrispondente al regime attuale di rotazione può risultare, nel caso più sfavorevole, inferiore alla coppia resistente del carico meccanico, per cui il motore si arresta. Inoltre il rallentamento iniziale può causare difetti di lavorazione, nel caso di piccoli motori che azionano macchine utensili.

I **motori sincroni** subiscono gli stessi effetti dei motori asincroni, tuttavia essi sono generalmente di grossa taglia e quindi presentano un'inerzia elevata. Occorre osservare però che il riavviamento di un motore sincrono viene normalmente effettuato in un modo che presenta una certa complessità.

Nel caso di parchi di motori (presenti ad esempio in impianti fluidici, treni di lavorazione, reparti di macchine tessili o di stampaggio) è necessario coordinare le protezioni delle singole macchine, le sequenze di riavviamento ed eventualmente ricorrere a un sistema di controllo automatico. Questo al fine di evitare che al ritorno della tensione i motori non distaccati si trovino tutti contemporaneamente in fase di riavviamento più o meno completo (a seconda del tempo trascorso), provocando forti cadute di tensione sulla linea di alimentazione, con possibili difficoltà di ripresa del regime di funzionamento.

Per gli azionamenti a velocità variabile, costituiti da macchine in corrente continua

alimentate da ponti convertitori controllati, gli effetti dipendono dal modo di funzionamento:

- in modo motore il ponte funziona da raddrizzatore e alla scomparsa della tensione il motore rallenta; al ritorno della tensione si verifica uno sfasamento degli impulsi di comando dei tiristori del ponte a causa del ritardo del regolatore di velocità e si possono verificare interventi di protezioni (per es.: fusibili dei tiristori), con conseguente distacco della macchina
- in modo invertitore (frenatura a recupero di energia) se la tensione di rete è inferiore alla forza elettromotrice interna, i tiristori in conduzione non commutano e si può avere un forte assorbimento di corrente, con distacco del motore per intervento delle protezioni.

Negli **azionamenti a frequenza variabile**, costituiti da **motori sincroni** alimentati da un sistema raddrizzatore-invertitore, si ha la perdita di sincronismo dei motori, con possibili danni alla produzione (gli impianti tessili sono tra i più critici). L'inconveniente si verifica in modo particolarmente severo quando la regolazione di velocità non è progettata in modo da mantenere i motori, con un ampio margine, nella zona di funzionamento stabile.

Negli **azionamenti a velocità variabile**, costituiti da **motori asincroni** alimentati da convertitori di frequenza, è in generale possibile la ripresa al volo del motore, ovvero, dopo un'interruzione, la ripresa di funzionamento del motore più rapida e, nel contempo, più soft possibile (con tempi minimi e spunti di corrente e di coppia limitati), ripresa la cui efficienza è funzione anche dell'inerzia del motore.

In alcuni processi produttivi il **riscaldamento** dei pezzi in lavorazione può costituire un elemento critico, che non tollera interruzioni superiori a qualche secondo.

Un altro problema è posto dalla ricaduta dei **teleruttori**, che spesso provoca un arresto intempestivo del motore e dall'intervento troppo rapido della **protezione di minima tensione**.

I teleruttori più piccoli ricadono già in presenza di buchi che riducono la tensione al 70% del valore nominale, per una durata di qualche decina di millisecondi.

I **sistemi elettronici di controllo ed elaborazione dati** sono i carichi più sensibili ai buchi ed alle brevi interruzioni di tensione che, in assenza di opportune precauzioni, provocano arresti di funzionamento con necessità di rielaborazione o ricostruzione delle informazioni perdute.

Allo stato attuale della tecnologia il rischio di alterazione di dati residenti nelle memorie interne o in quelle di massa è invece molto basso.

Dal punto di vista dei problemi qui trattati si possono distinguere:

- PLC e microprocessori dedicati al controllo di singole macchine non integrati in un sistema di controllo complesso (sono i più facili da proteggere e i danni sono limitati);
- sistemi di controllo di processo integrati gerarchicamente su più livelli (le conseguenze possono essere gravi dal punto di vista economico: l'arresto anche di uno solo dei componenti il sistema può provocare l'arresto dell'intero processo. La protezione dei componenti di livello 1, distribuiti accanto alle macchine, risulta molto onerosa e non sempre fattibile come più avanti illustrato, mentre la protezione dei livelli superiori non crea grossi problemi in quanto questi ultimi sono normalmente ubicati in sale dedicate);
- sistemi centralizzati di elaborazione dati: vale quanto detto per i livelli superiori dei sistemi di controllo di processo;
- apparati per l'informatica di ufficio: pur essendo altrettanto sensibili, raramente determinano perdite di attività consistenti, perché lavorando in modo interattivo consentono all'operatore di salvare periodicamente il suo lavoro e di limitare i rischi.

Armoniche

La distorsione armonica della tensione in un punto qualsiasi di una rete elettrica è la conseguenza delle armoniche di corrente prodotte da carichi (per es.: ponti convertitori) e da elementi non lineari della stessa rete (per es.: trasformatori).

I motori sincroni e asincroni sono assimilabili a generatori di tensioni armoniche, mentre gli apparecchi ad arco elettrico (saldatrici, forni), i reattori a nucleo magnetico, i ponti raddrizzatori e di conversione, agiscono come generatori di correnti armoniche.

Le armoniche possono essere generate come componenti di uno spettro continuo (sono presenti tutte le frequenze) o discreto (sono presenti soltanto alcune armoniche). Nella prassi comune, le frequenze corrispondenti alle linee di spettri continui o discreti non coincidenti con multipli interi della frequenza di rete (50 Hz) sono denominate frequenze spurie o interarmoniche.

In campo industriale i forni ad arco sono sorgenti di distorsione a spettro continuo; i ponti raddrizzatori e convertitori di tipo controllato generano spettri discontinui con valore accentuato per le armoniche caratteristiche.

Tra i carichi dell'utenza domestica e commerciale vi sono molte sorgenti di armoniche, tra cui i televisori, gli impianti di illuminazione a lampade fluorescenti, i regolatori di luce a

parzializzazione, utensili portatili e altri apparecchi a controllo elettronico di velocità.

Si tratta di carichi il cui contributo individuale è modesto, ma che nel loro insieme possono creare notevoli livelli di disturbo sulla rete pubblica.

Effetti

Gli effetti dovuti alla presenza di armoniche, anche se non istantaneamente visibili, possono avere serie conseguenze nel medio e lungo termine. Tali conseguenze sono essenzialmente legate ad un funzionamento delle apparecchiature e dei componenti, sia di rete sia dell'impianto del Cliente, a tensioni, correnti e frequenze per le quali non erano stati dimensionati e causa, in generale, di sovrariscaldamenti (aumento delle perdite con riduzione della possibilità di funzionamento a pieno carico), aumento dei valori di picco delle tensioni di alimentazione, vibrazioni e fatica meccanica, invecchiamento precoce delle apparecchiature.

Nei **trasformatori** le armoniche, soprattutto quelle di corrente, producono essenzialmente perdite supplementari nel ferro e nel rame.

Nei **motori sincroni e asincroni** le armoniche determinano perdite supplementari nel ferro e nel rame e coppie pulsanti, che possono sollecitare in modo indebito gli organi di accoppiamento meccanico, in particolare quando la loro frequenza si approssima alla frequenza caratteristica di oscillazione torsionale degli alberi.

I **cavi** sono soggetti a un aumento delle perdite dielettriche e nel rame; nel caso di cavi di neutro il riscaldamento può derivare dalla circolazione di correnti armoniche di ordine 3 e multiple.

Anche i **condensatori** subiscono un aumento delle perdite dielettriche, ma il problema maggiore è posto dal fatto che la loro reattanza diminuisce in proporzione diretta con il rango delle armoniche, per cui il tasso di correnti armoniche che li attraversano è molto superiore a quello di distorsione della tensione ai loro estremi. Ne segue che il valore efficace di una corrente determinata da una tensione distorta è più elevato di quello prodotto da una tensione sinusoidale avente lo stesso valore efficace della tensione distorta. Da non trascurare è inoltre la possibilità di innesco di condizioni di risonanza tra i condensatori e gli elementi induttivi di rete, con aumenti delle correnti e delle tensioni armoniche corrispondenti alla frequenza di risonanza.

Si pone inoltre il problema delle interferenze sui **circuiti telefonici**.

I dispositivi basati sull'**elettronica di potenza**, oltre ad essere tra i principali responsabili nella

generazione di armoniche, sono a loro volta influenzati dalla presenza di armoniche, specie di tensione, in merito a problemi di sincronizzazione e commutazione (ponti convertitori a diodi o tiristori).

Relativamente alle interarmoniche (allo stato attuale rappresentano un fenomeno ancora allo studio), gli effetti prodotti si possono ricondurre essenzialmente alla origine di fenomeni di flicker, nel caso in cui la frequenza interarmonica sia prossima alla fondamentale.

Squilibrio della tensione

Le condizioni di squilibrio possono creare inconvenienti, soprattutto nelle macchine rotanti sincrone e asincrone, perché la circolazione di correnti di sequenza inversa negli avvolgimenti determina un campo rotante di senso opposto a quello normale.

Compaiono quindi nel rotore correnti di frequenza circa doppia di quella di rete, che provocano perdite supplementari, con seguenti sopraelevazioni di temperatura, riduzione delle coppie di avviamento, rumore e vibrazioni.

Nei ponti convertitori lo squilibrio della tensione di alimentazione provoca la comparsa eli armoniche di corrente supplementari, rispetto a quelle caratteristiche.

Segnali e disturbi ad alta frequenza

I principali sistemi di trasmissione di segnali in Italia oggi utilizzati, su linee aeree di alta tensione per trasmissioni con onde convogliate, hanno la banda di frequenza tra 80 e 400 kHz.

Alla casistica dei disturbi finora esaminati va aggiunto quello determinato da sorgenti di segnali in alta frequenza (AF).

Si tratta di apparecchi in cui la presenza di tali frequenze è intrinseca al funzionamento (per es.: sistemi di telecomunicazioni, forni a induzione o a microonde, alimentatori a commutazione, televisori), oppure è un fenomeno secondario, come per i motori a collettore.

L'effetto dei disturbi AF più facilmente avvertito è il prodursi sugli apparecchi radio di crepitii e ronzii e, sui televisori, di strisce orizzontali instabili, ma essi possono agire in forma meno immediatamente identificabile anche su altre apparecchiature (ad esempio strumenti di precisione e apparati medicali).



Progetto grafico e impaginazione
Pixel Communication

Stampa
Tipografia Facciotti srl

A cura di
Direzione Comunicazione
Enel SpA
00198 Roma, viale Regina Margherita 137

Foto di copertina
Autore: Fabio Sassara - Titolo: Pilone Villa S. Giovanni

Edizione fuori commercio
Stampato in Italia nel mese di febbraio 2006 in 10.000 copie

Documento scaricabile dal sito internet: www.enel.it/infrastrutturereti



