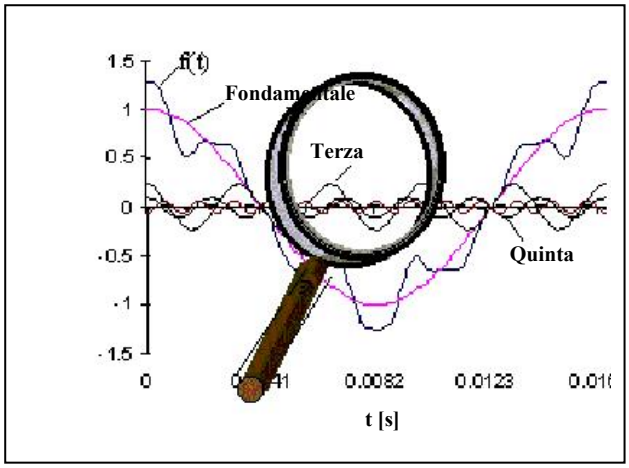
Introduzione alla *"Power Quality"*



1. Premessa **2**

2. Le Cinque Qualità **2**

3. Variazioni ed eventi **3**

3.1 Le variazioni 3
3.2 Gli eventi 5

4. Definizioni e termini nella Normativa Internazionale IEC e IEEE **6**

4.1 Fenomeni transitori 9
4.2 Transitorio di tipo impulsivo 9
4.3 Transitori di tipo oscillatorio 9
4.4 Variazioni della tensione di breve durata 11
4.5 Voltage sags 11
4.6 Voltage swells 13
4.8 Variazioni di tensione di lunga durata 14
4.9 Sovratensioni 15
4.10 Sottotensioni 15
4.11 Interruzioni prolungate 15
4.12 .Dissimmetria della tensione 16
4.13 Deformazione delle forme d'onda 16
4.14 Fluttuazioni di tensione 19
4.15 Variazioni di frequenza 20

1. Premessa

Attualmente non tutti hanno un'opinione concorde sull'impiego del termine *"Power Quality"* e sul suo esatto significato, ma è difficile trovare qualcuno che non riconosca l'importanza di questo aspetto nell'ambito dei sistemi elettrici, soprattutto dalla seconda metà degli anni novanta.

In molte pubblicazioni scientifiche tale termine è utilizzato con diversi significati, in altre si usa una terminologia leggermente diversa, come *"Quality of Power Supply"* e *"Voltage Quality"*; tutte queste espressioni hanno in comune lo stesso aspetto di fondo: l'interazione tra sistema elettrico ed il sistema dei carichi disturbanti e non.

Tale problematica non è nuova giacché lo scopo di un sistema elettrico per l'energia è sempre stato quello di produrre e distribuire energia elettrica alle varie utenze. La novità, invece, consiste nel considerare la suddetta interazione in termini di qualità della potenza fornita ai carichi e di qualità dell'impatto delle utenze sul sistema di alimentazione. Per questo motivo appare logico parlare di interazione fra fornitore e cliente oltre che di interazione tra sistema elettrico e carico: da una parte il consumatore di energia elettrica non è più un semplice carico ma un cliente e, come tale, richiede il prodotto "potenza elettrica" con una certa qualità; dall'altra i carichi del cliente possono avere un impatto negativo sul sistema elettrico e quindi sono soggetti anch'essi ad una valutazione in termini di qualità.

L'espressione "*Power Quality*" è, quindi, quella più idonea a rappresentare la problematica descritta.

Il crescente interesse nella *Power Quality* è legato ad una serie di fattori:

a. negli ultimi anni si sono diffusi alcune tipologie di carichi, come quelli elettronici, molto sensibili ai disturbi;
b. l'impiego massiccio dei convertitori elettronici ha determinato un considerevole incremento dei disturbi di tensione;
c. le aziende sono molto sensibili alle interruzioni dell'alimentazione per l'impatto negativo che le interruzioni possono avere sui profitti;
d. attualmente sono disponibili sofisticati dispositivi di misura e potenti elaboratori di dati che hanno facilitato il rilievo dei vari disturbi;
e. nei Paesi avanzati (Paesi dell'Europa e dell'America settentrionale) i sistemi elettrici sono caratterizzati da disponibilità ed affidabilità consistenti per cui la qualità è un obiettivo conseguibile; d'altro canto in altri Paesi dove l'energia elettrica è disponibile per poche ore al giorno, non c'è ovviamente interesse per i problemi di qualità.

Le problematiche analizzate nei successivi due paragrafi rappresentano solo una parte di quelle esistenti.

Si è avuto cura di riportare due distinte visioni dei fenomeni legati ai problemi di *Power Quality*. La prima focalizza l'attenzione sulla tipologia dei fenomeno fisici più che sull'esatta definizione. La seconda, invece, rispecchia abbastanza fedelmente quella presente nelle norme internazionali (*IEEE, IEC*).

2. Le Cinque Qualità

La "*Power Quality"* è intrinsecamente legata all'interazione tra il sistema elettrico ed i carichi; essa porta in conto sia la qualità della tensione che la qualità della corrente. E' tuttavia possibile definire altri termini di qualità ciascuno legato ad un aspetto specifico pur nella consapevolezza che non vi sia una codificazione standardizzata dei termini e della nomenclatura dei disturbi. Si parla, in tal senso, delle "Cinque Qualità"; esse sono

- qualità della tensione;

- qualità della corrente,
- qualità dell'energia,
- qualità dell'alimentazione
- qualità dell'utenza.

Nel seguito si specificano i fenomeni di interesse per ciascuna qualità.

-*Qualità della tensione (Voltage Quality)*
Si studiano i fenomeni legati allo scostamento della tensione dalla forma d'onda ideale.
Per tensione ideale,in un sistema in corrente alternata, si deve intendere una forma d'onda composta da un'unica componente sinusoidale di ampiezza, fase e frequenza costanti con la frequenza uguale alla frequenza fondamentale di esercizio del sistema, pari a:

$$v(t) = \sqrt{2}V^* sen(2\pi f^* t - \phi^*) \qquad (1)$$

dove V^*, ϕ^* ed f^* sono di valore costante.

-*Qualità della corrente (Current Quality)*
Si studiano i fenomeni legati allo scostamento della corrente rispetto alla forma d'onda ideale.
Vale per la forma d'onda ideale di corrente quanto detto per la tensione; essa è espressa dalla relazione

$$i(t) = \sqrt{2}I^* sen(2\pi f^* t - \gamma) \qquad (2)$$

-*Qualità dell'energia (Power Quality*)
Si studiano i fenomeni legati alla qualità della tensione e/o alla qualità della corrente

-*Qualità dell'alimentazione (Supply Quality)*
Si studiano i fenomeni legati non solo alla qualità della tensione ma anche alla qualità di servizio alle utenze non strettamente di tipo tecnico (per esempio, qualità commerciale del servizio di fornitura dell'energia, tempi e modi di intervento di riparazione e/o manutenzione sugli impianti, eccetera).
-*Qualità dell'utenza (Consumption Quality)*
Si studiano i fenomeni legati non solo alla qualità della corrente, ma anche alla qualità "non tecnica" dell'utente (per esempio si studiano anche i comportamenti rispetto alle clausole presenti nel contratto di fornitura).

3. Variazioni ed eventi

I disturbi di *Power Quality* possono essere distinti in due tipologie in relazione all'entità dello scostamento della forma d'onda non ideale rispetto a quella ideale. In particolare, una deviazione di piccola entità è indicata con il termine "variazione", mentre uno scostamento elevato assume il nome di "evento". Nel seguito, si analizzano i principali fenomeni classificabili come variazioni e come eventi.

3.1 Le variazioni

Possono essere considerate variazioni i seguenti tipi di disturbi:

a. Variazione dell'ampiezza della tensione
Si considera l'incremento o la diminuzione dell'ampiezza della fondamentale di tensione. Tali scostamenti possono essere causati dalla variazione della potenza attiva e reattiva assorbita dai

carichi, dall'azione di trasformatori con rapporto variabile sotto carico, dalla connessione di banchi di capacità o di induttanze.

b. Variazione della frequenza della tensione

Si intende per variazione della frequenza della tensione di alimentazione lo scostamento del valore della frequenza fondamentale della tensione dal suo valore nominale. Tale fenomeno accade quando si ha il valore della potenza generata dal sistema di produzione si discosta da quella assorbita dalle utenze

c. Variazione della fase della tensione

Si riferisce al possibile mutamento nel tempo della fase del vettore, che rappresenta la tensione di alimentazione, rispetto alla fase che viene presa come riferimento.

Generalmente tale tipologia di variazione può determinare problemi al funzionamento dei carichi trifase ed, in particolare, ai convertitori controllati. L'accensione dei dispositivi è, infatti, definita in relazione agli incroci delle tensioni concatenate. E' chiaro allora che una tale variazione della fase della alimentazione possa essere causa di una disfunzione del sistema di controllo.

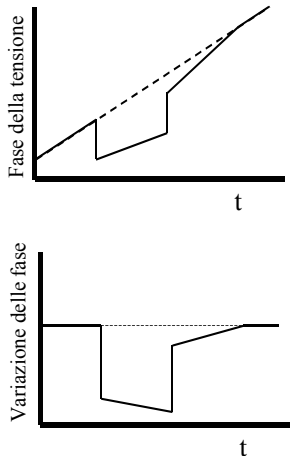


Fig.1: Rappresentazione della variazione di fase

La Fig.1 rappresenta l'andamento della fase di una tensione sinusoidale ideale con la linea tratteggiata e, con la linea continua, quello di una tensione non ideale. E' visibile come in tale condizione venga a verificarsi una variazione della fase della tensione. Nella figura in basso è rappresentata la corrispondente differenza di fase presente fra la fase di una tensione ideale(linea tratteggiata) e la fase di quella non ideale non ideale(linea continua).

d. Variazione dell'ampiezza della corrente

La corrente assorbita dai carichi è generalmente non costante e la sua variazione determina la variazione della tensione di alimentazione. Nell'ambito della progettazione degli impianti, la variabilità della corrente gioca un ruolo determinante, basti pensare che il dimensionamento delle linee è condotto, tipicamente, per le condizioni di massimo assorbimento di corrente mentre la tariffa è principalmente legata al valore medio della corrente.

e. Dissimmetria delle tensioni di fase

Si considera lo scostamento della terna delle tensioni di fase da quella ideale costituita da una terna di tensioni di sola sequenza diretta. La dissimmetria è, dunque, presente perché le tensioni di fase $\{e_a, e_b, e_c\}$ non sono della stessa ampiezza e/o non sono sfasate di 120° in senso antiorario. Essa può essere causata dall'alimentazione di carichi monofase che assorbono potenze attive e reattive non equilibrate sulle tre fasi, dalla dissimetria della rete di alimentazione.

f. Squilibrio delle correnti di fase

Si considera lo scostamento della terna delle correnti di fase da quella ideale costituita da una terna di correnti di sola sequenza diretta. La dissimmetria è, dunque, presente perché le correnti di fase $\{i_a, i_b, i_c\}$ non sono della stessa ampiezza e/o non sono sfasate di 120° in senso antiorario. Essa può essere causata dall'alimentazione di carichi monofase che assorbono potenze attive e reattive non equilibrate sulle tre fasi, dalla dissimetria della rete di alimentazione.

g. Distorsione armonica della tensione

Si considera lo scostamento della forma d'onda di tensione dalla tensione sinusoidale a frequenza pari a quella nominale di esercizio (in Italia pari a 50 Hz). Lo scostamento si concretizza nella presenza di componenti a frequenza diversa dalla 50 Hz. Tipicamente si fa riferimento a componenti che hanno una frequenza multipla superiore di 50 Hz. Sono indicate con il termine di componenti armoniche della tensione di ordine h, con $h=f_h/f_1$ se f_h è la frequenza del componente armonico. La distorsione armonica della tensione è dovuta alla presenza di carichi non lineari e di trasformatori in saturazione, in quanto si assume che, generalmente, i generatori di potenza connessi all'alimentazione producono unicamente tensioni alla frequenza nominale di esercizio.

h. Distorsione armonica della corrente.

Si considera lo scostamento della forma d'onda di corrente dalla corrente sinusoidale a frequenza pari a quella nominale di esercizio (in Italia pari a 50 Hz). Lo scostamento si concretizza nella presenza di componenti a frequenza diversa dalla 50 Hz. Tipicamente si fa riferimento a componenti che hanno una frequenza multipla superiore di 50 Hz. Sono indicate con il termine di componenti armoniche della corrente di ordine h, con $h=f_h/f_1$ se f_h è la frequenza del componente armonico. La distorsione armonica della corrente è dovuta essenzialmente alla presenza di carichi non lineari e tempo varianti.

3.2 Gli eventi

Possono essere considerati eventi, i seguenti fenomeni di disturbo:

a. Interruzione della tensione

In tale condizione, la tensione ai terminali di alimentazione è prossima allo zero; in base alla norma *IEEE* si ha un'interruzione se la tensione scende al di sotto di 1% della tensione nominale, in base alla norma *IEC*, invece, il limite è il 10%.

Se l'assenza di tensione si prolunga per più di 1 minuto si parla di lunga interruzione, altrimenti di breve interruzione. Le interruzioni sono causate principalmente da guasti e dal successivo intervento dei sistemi di protezione, rottura dei conduttori, manutenzione dei componenti del sistema di potenza;

b. Sottotensioni

Si fa riferimento alla riduzione dell'ampiezza della tensione di alimentazione seguita da un successivo ripristino; in particolare quelle di breve durata prendono il nome di "buchi di tensione" (dall'inglese "voltage sags", espressione usata dalle norme *IEEE* e presente in molte pubblicazioni scientifiche), mentre quelle di lunga durata sono chiamate semplicemente sottotensioni. Un voltage sag può essere definito tale se la riduzione della tensione è compresa tra 90% e 10% del valore nominale e il ripristino si ha in un tempo compreso tra 10 ms e 1 minuto. I buchi di tensione sono causati dai guasti di corto circuito nei sistemi elettrici e

dall'avviamento di grossi motori o dalla inserzione di gruppi di generazione sulla rete di distribuzione.

c. Sovratensioni

Si fa riferimento all'innalzamento della tensione di alimentazione seguita da un successivo ripristino; in particolare quelle di breve durata prendono il nome di "voltage swell", mentre quelle di lunga durata sono chiamate semplicemente sovratensioni. Un voltage swell può essere definito tale se la tensione supera 110% del valore nominale e il ripristino si ha in un tempo compreso tra 10 ms e 1 minuto. Lunghe e brevi sovratensioni sono causate da fulminazioni, improvvise riduzioni della potenza assorbita dai carichi, corto circuiti monofasi e da eventuali non linearità.

d. Eventi molto veloci.

Si fa riferimento a disturbi di durata breve, tipicamente un ciclo della frequenza del sistema o anche meno; in questo caso si parla di eventi transitori (dall'inglese "Transient Events"), in particolare i Voltage Sags transitori sono indicati con l'espressione inglese "Notches".

Nella Fig.2 si sfrutta il piano ampiezza-durata evento per riassumere le considerazioni fatte circa le variazioni e gli venti riferiti all'ampiezza della tensione.

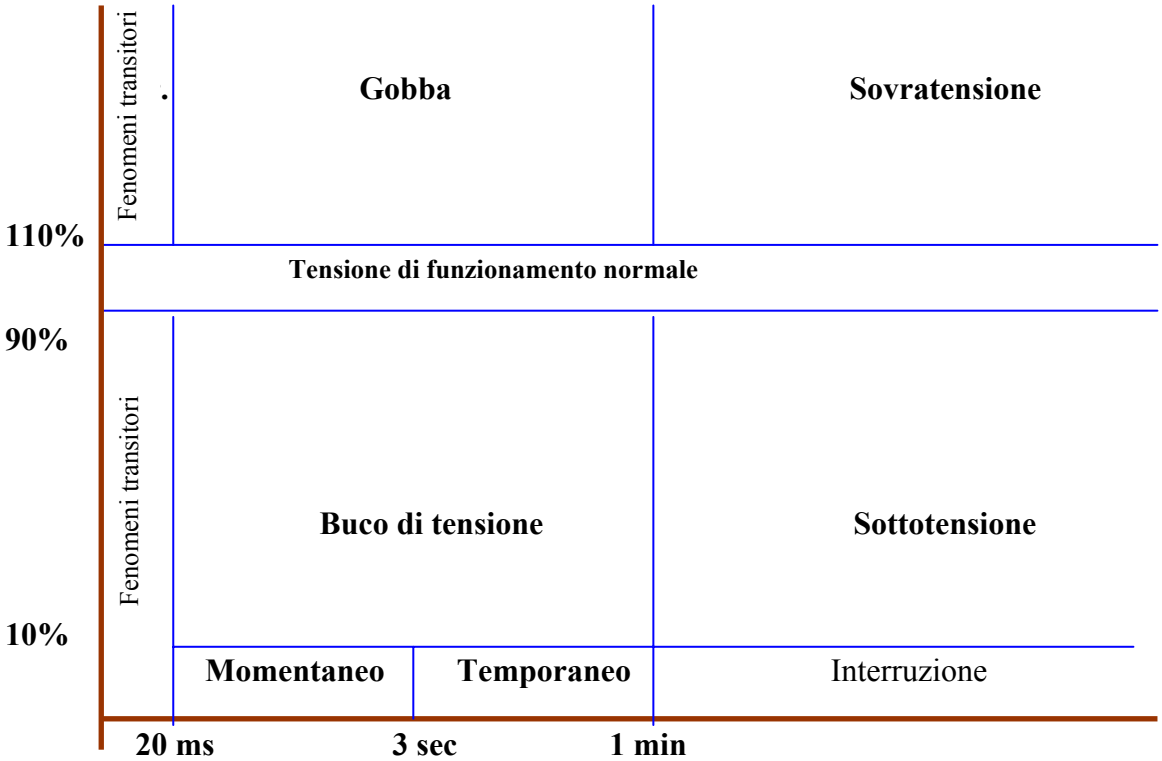


Fig. 2- Schematizzazione degli eventi relativi alla tensione di alimentazione

4. Definizioni e termini nella Normativa Internazionale IEC e IEEE

Il termine "*Power Quality*" (PQ) si riferisce ad una ampia varietà di fenomeni elettromagnetici che caratterizzano la tensione e/o la corrente in un dato punto di un sistema elettrico.

L'analisi che segue, pur nella sua sinteticità, è finalizzata a fornire le caratteristiche dei principali fenomeni elettromagnetici che causano problemi di "*Power Quality*", oltre che alcuni esempi.

Nel seguito si farà riferimento, laddove è possibile, alle Normative Nazionali ed Internazionali soprattutto per i valori tipici delle grandezze scelte a rappresentare ciascun tipo di fenomeno.

Si considera l'approccio introdotto nell'ambito della compatibilità elettromagnetica per descrivere tutti i fenomeni della PQ. Tale approccio è stato accettato dalla comunità scientifica internazionale attraverso l'adozione delle norme emesse dal comitato 77 della IEC (*International Electrotechnical Commission)*.

La IEC classifica i fenomeni di disturbo elettromagnetico in diversi gruppi come mostrato nella Tabella I. I termini "alta frequenza " e "bassa frequenza" non si riferiscono a valori specifici di intervalli di frequenza ma piuttosto indicano la differenza relativa nel contenuto spettrale dei disturbi elencati.

Tab.I: Classificazione secondo la IEC dei principali fenomeni che causano disturbi elettromagnetici

Fenomeni condotti	Armoniche, Interarmoniche
	Segnali di controllo
	Fluttuazione della tensione
	Buchi di tensione ed interruzioni
	Dissimmetria della tensione
	Variazioni della frequenza
	Tensioni indotte a bassa frequenza
	Componenti continue nei sistemi in alternata
Fenomeni radiati a bassa frequenza	Campi magnetici
	Campi elettrici
Fenomeni condotti ad alta frequenza	Tensioni o correnti indotte
	Transitori unidirezionali
	Transitori di tipo oscillatorio
Fenomeni radiati ad alta frequenza	Campi magnetici
	Campi elettrici
	Campi elettromagnetici
	Onde continue
	Transitori
Fenomeni di scarica elettrostatica	-----
Impulsi elettromagnetici nucleari	-----

A partire da tale macroscopica classificazione, l'IEEE *(Institute of Electrical and Electronic Engineers Institute*) attraverso l'emanazione delle raccomandazioni Std.1159-1995, ha proposto una ulteriore suddivisione dei fenomeni causa di disturbi condotti nei sistemi elettrici. Tale classificazione è attualmente quella di riferimento nell'ambito degli studi di PQ. Si faccia riferimento alla Tabella II, dove sono specificati i valori assoluti delle grandezze tipiche dei fenomeni che causano i disturbi condotti riportati nella Tabella I.

Tab.II: Categorie e caratteristiche tipiche dei fenomeni elettromagnetici nei sistemi elettrici

(IEEE Std 1159 – 1995)

Categoria	Spettro	Durata	Ampiezza
Transitori			
Impulsivi			
Nanosecondo	5 ns (tempo di salita)	< 50 ns	
Microsecondo	1μs (tempo di salita)	50 ns-1 ms	
Millisecondo	0.1ms (tempo di salita)	> 1ms	
Oscillatori			
Bassa frequenza	< 5 kHz	0.3 – 50 ms	0 – 4 p.u.
Media Frequenza	5-500 kHz	20 μs	0 – 8 p.u.
Alta frequenza	0.5-5 MHz	5 μs	0 – 4 p.u.
Variazioni di breve durata			
Istantanee			
Sag		0.5 – 30 periodi	0.1 – 0.9 p.u.
Swell		0.5 – 30 periodi	1.1 – 1.8 p.u
Momentanee			
Interruzioni		0.5 periodi – 3 s	< 0.1 p.u.
Sag		30 periodi – 3 s	0.1 – 0.9 p.u
Swell		30 periodi – 3 s	1.1 – 1.4 p.u
Temporanee			
Interruzioni		3 s – 1 min	< 0.1 p.u.
Sag		3 s – 1 min	0.1 – 0.9 p.u
Swell		3 s – 1 min	1.1 – 1.2 p.u.
Variazioni di lunga durata			
Interruzioni prolungate		> 1min	0.0 p.u.
Sottotensioni		> 1min	0.8 – 0.9 p.u.
Sovratensioni		> 1min	1.1 – 1.2 p.u.
Dissimmetrie		permanente	0.5 – 2%
Distorsioni			
DC Offset			0 – 0.1 %
Armoniche	0-100 kHz	permanente	0 – 20 %
Interarmoniche	0-5 kHz	permanente	0 – 2 %
Notching		permanente	
Noise	Larga banda	permanente	0 – 1 %
Fluttuazione delle tensione	< 25 Hz	intermittente	0.1 – 7 %
Variazioni della frequenza		< 10 s	

L'analisi che segue, lungi dall'essere esaustiva, considera ciascun fenomeno riportato nella Tabella II avendo cura, dove possibile, di individuarne le origini e gli effetti sul sistema elettrico.

4.1 Fenomeni transitori

Il termine transitorio è stato utilizzato a lungo nell'analisi dei sistemi di potenza per indicare un evento che, pur se indesiderabile, è momentaneo in natura.

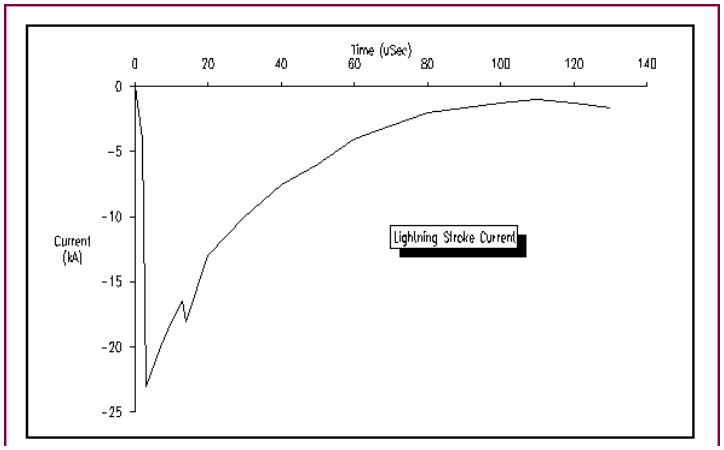
Le accezioni del termine "transitorio" nella pratica comune sono in ogni caso molto ampie e possono indurre a spiacevoli equivoci, soprattutto nell'analisi dei fenomeni legati alla qualità dell'energia; in tale ambito è opportuno specificare con maggiore dettaglio i fenomeni ai quali ci si riferisce. A tal fine è opportuno dapprima classificare i fenomeni transitori in due categorie: transitori di tipo impulsivo e transitori di tipo oscillatorio.

4.2 Transitorio di tipo impulsivo

Un transitorio di tipo impulsivo è un'improvvisa variazione a frequenza diversa da quella di esercizio della tensione o della corrente, o di entrambi; tale variazione è sempre di un'unica polarità.

I transitori di tipo impulsivo sono caratterizzati normalmente dal tempo di salita e di decadimento (tali valori possono anche dedursi dal contenuto spettrale). Una indicazione tipica di un transitorio di tipo impulsivo è, ad esempio, "1.2 x 50 μs -2000V ". Tale dicitura nominalmente va da zero al valore massimo di 2000 V in 1.2 μs e poi raggiunge la metà del suo valore massimo in 50μs.

La causa più comune di transitori impulsivi è il fenomeno della fulminazione. La figura illustra un tipico transitorio impulsivo di corrente causato da una fulminazione.



Transitorio impulsivo di corrente dovuto ad una fulminazione

A causa delle alte frequenze coinvolte, la forma dei transitori di tipo impulsivo può modificarsi rapidamente; inoltre in funzione dei valori dei componenti del sistema e del punto di osservazione del fenomeno può avere caratteristiche significativamente diverse. I transitori impulsivi possono eccitare la frequenza di risonanza dei circuiti del sistema e dar luogo a transitori di tipo oscillatorio.

4.3 Transitori di tipo oscillatorio

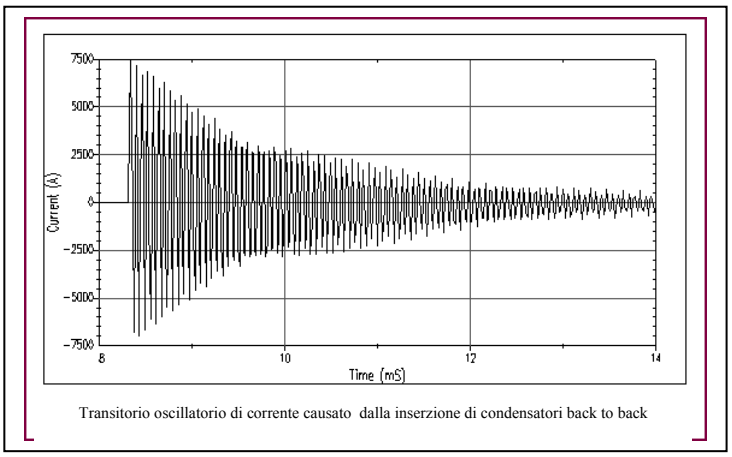
Un transitorio di tipo oscillatorio è un'improvvisa variazione di tipo bipolare, a frequenza diversa da quella di esercizio del sistema, del valore della tensione o della corrente, o di entrambi.

Un transitorio di tipo oscillatorio si manifesta nella variazione istantanea dei valori di tensione o di corrente con polarità rapidamente variabile. È caratterizzato dal contenuto spettrale della grandezza che subisce il transitorio, dalla sua durata e dall'ampiezza. Nella

Tabella II i transitori di tipo impulsivo sono definite in diverse sottoclassi in funzione del contenuto spettrale (alto, medio e basso). Le gamme di frequenza per questa classificazione fanno riferimento ai più comuni tipi di fenomeni oscillatori che hanno luogo nei sistemi elettrici.

I transitori di tipo oscillatorio con una frequenza fondamentale maggiore di 500 kHz e con una durata tipica misurata in microsecondi (o alcuni periodi della frequenza fondamentale) sono considerati transitori di tipo oscillatorio ad alta frequenza. Questi transitori sono spesso la risposta di una sezione del sistema ad un transitorio impulsivo.

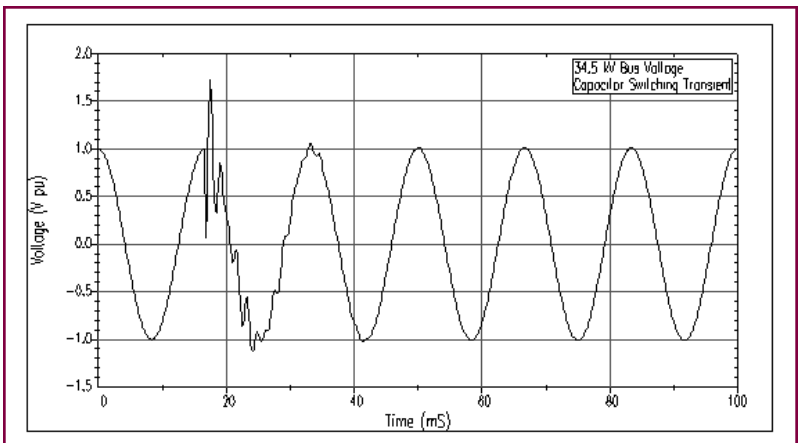
Un transitorio con una frequenza fondamentale tra 5 e 500 kHz e con durata dell'ordine decine di microsecondi (o in alcuni periodi della frequenza fondamentale) è definito un transitorio di media frequenza.



Transitorio oscillatorio di corrente causato dalla inserzione di condensatori back to back

L'inserzione di banchi di condensatori "*back to back*" porta a correnti transitorie di tipo oscillatorio di decine di kHz, come illustrato nella figura. a lato.

Un transitorio con una frequenza fondamentale di valore inferiore a 5 kHz e con una durata da 0.3 m a 50 m, è classificato come un transitorio di bassa frequenza. Questa categoria di fenomeni è frequente nei sistemi di subtrasmissione ed in quelli di distribuzione, ed è causata da eventi di diverso genere. La causa più frequente è l'inserzione di banchi di condensatori, che tipicamente determina un transitorio di tipo oscillatorio sulla tensione con una frequenza principale tra 300 e 900 Hz.



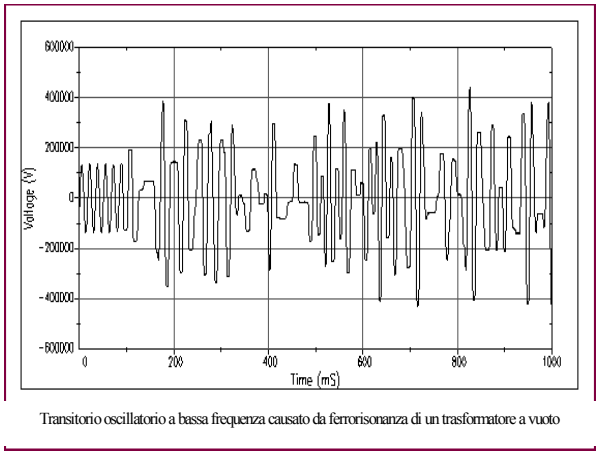
Transitorio oscillatorio a bassa frequenza causato dalla inserzione di condensatori

Il valore di picco dell'oscillazione è solitamente circa 1.3 - 1.5 pu con una durata tra 0.5 e 3 periodi, in funzione del fattore si smorzamento del sistema. La figura a lato mostra un transitorio di tipo oscillatorio di bassa frequenza causato dall'inserzione di un banco di condensatori.

Transitori di tipo oscillatorio di bassa frequenza (frequenze principali meno di 300 Hz) si hanno luogo anche in sistemi di distribuzione; tipicamente associati a fenomeni di ferrorisonaza o all'inserzione di trasformatori.

4.4 Variazioni della tensione di breve durata

Questa comprende la categoria di fenomeni che la IEC (*International Electrotechnical*



Transitorio oscillatorio a bassa frequenza causato da ferrorisonanza di un trasformatore a vuoto

Commission) definisce come "*Voltage Dips* e *Short Interruptions*". Le variazioni di breve durata possono essere, di tipo istantaneo, momentaneo o temporaneo, in funzione del tempo di permanenza del disturbo, così come evidenziato nella Tabella II.

Le variazioni di tensione di breve durata sono possibili sia in condizioni di funzionamento anomale (corto circuiti) sia in condizioni di funzionamento normale (inserzione di carichi di elevata potenza). Con riferimento alle variazioni di breve durata legate a fenomeni di corto circuito, si precisa che l'impatto sulla tensione è sempre legato all'intervento dei sistemi di protezione.ed in funzione di diversi parametri di esercizio e di

Le variazioni di breve durata sono classificate come:

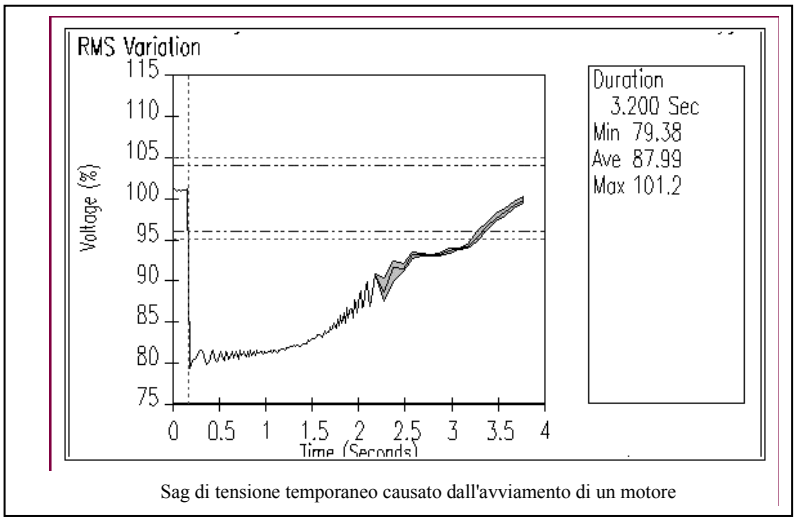
- *"voltage sags*" (buchi di tensione)
- *"voltage swells*" (gobbe di tensione);
- perdita completa dell'alimentazione (interruzioni).

4.5 Voltage sags

Un buco di tensione è una riduzione tra 0.1 pu e 0.9 pu del valore efficace della tensione o della corrente alla frequenza di esercizio per durate da 0.5 periodi ad un minuto.

In ambito internazionale, nel settore della "*Power Quality*" il termine "*sag*" è stato usato per molti anni per descrivere una generica riduzione di tensione di breve durata. Benché il termine non sia stato definito formalmente, è stato sempre più accettato e utilizzato da distributori, produttori e utenti finali. Il termine usato dalla IEC per descrivere questo fenomeno è "*dip*"; si precisa, in ogni modo, che i due termini ("*voltage sag*" e "*voltage dip*") sono considerati intercambiabili, con un maggiore uso del secondo negli Stati Uniti.

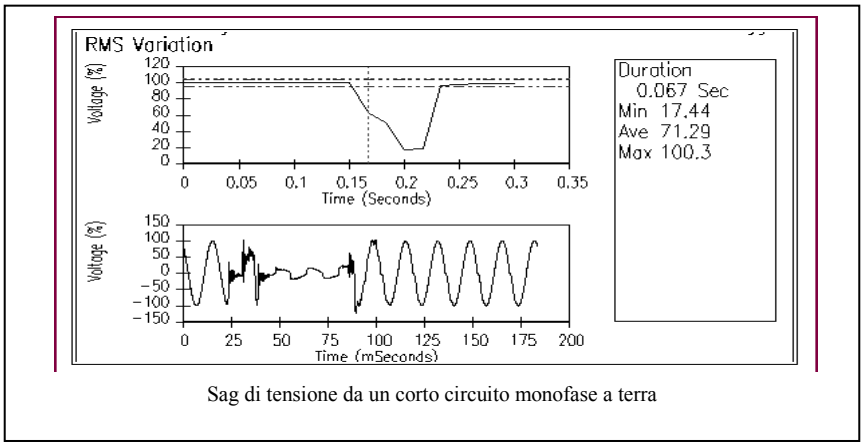
La terminologia utilizzata per descrivere l'ampiezza di un buco di tensione è spesso ambigua. Un "buco del 20%" può riferirsi ad una riduzione della tensione pari a 0.8 pu oppure a 0.2 pu. La terminologia da preferire sarebbe ovviamente quella che non lascia alcun dubbio circa il valore della tensione risultante: " un buco a 0.8 pu; " o "un buco di ampiezza pari a 20%". Quando non specificata altrimenti, un buco del 20% sarà considerato un evento durante il quale il valore efficace della tensione è diminuito del 20% fino ad assumere il valore di 0.8 p.u.. Inoltre, è opportuno sempre specificare il valore nominale della tensione, oppure quello di base preso a riferimento. La figura mostra un tipico buco di tensione che può essere associato ad un guasto monofase a terra. Come si evince dalla figura, un buco dell'80% permane per almeno tre periodi fino a quando l'interruttore di sottostazione non è in grado di interrompere la corrente di guasto. Tipici valori dei tempi di ripristino dei guasti sono nella gamma da tre a trenta periodi, a seconda dell'ampiezza della corrente di corto circuito e del tipo di protezione.



Sag di tensione temporaneo causato dall'avviamento di un motore

Come detto, i buchi di tensione sono di solito associati a fenomeni di corto circuito ma possono anche essere causati dall'inserzione di grossi carichi o dall'avviamento di motori di elevata potenza. La figura che segue mostra l'effetto dell'avviamento di un motore di grossa taglia. Un motore di ad induzione assorbe all'avviamento una corrente da 6 a 10 volte la sua corrente nominale a pieno carico. In questo caso, la tensione scende all'80% e quindi ritorna gradualmente al valore normale in circa tre secondi. Si noti quanto è differente l'orizzonte temporale del fenomeno se confrontato a quello dovuto a corto circuiti nell'alimentazione.

La durata tipica dei buchi di tensione non è stata ancora definita chiaramente. Valori tipici riportati in alcune pubblicazioni indicano intervalli che vanno da due millisecondi (1 decimo di periodo) ad un paio di minuti. Abbassamenti di tensione che durano meno di mezzo periodo, tuttavia, non si riflettono significativamente sulla variazione del valore efficace della tensione alla frequenza fondamentale. Tali eventi



Sag di tensione da un corto circuito monofase a terra

sono da considerarsi più propriamente come fenomeni di tipo transitorio.

Abbassamenti di tensione che durano più di un minuto possono essere compensati da dispositivi per la regolazione della tensione; essi sono associati a cause diverse dai fenomeni di corto circuito e sono, quindi, classificati come variazioni di lunga durata.

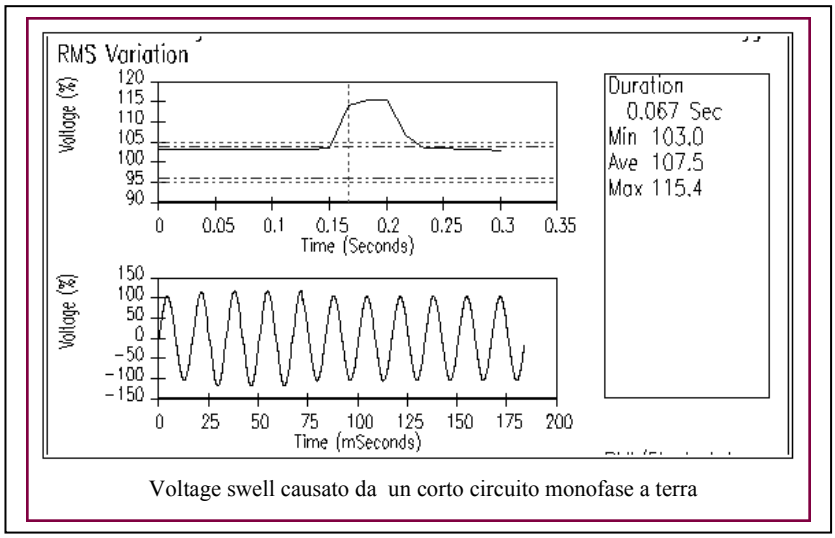
Le durate dei "*voltage sag*" sono suddivise in tre categorie: istantanee, momentanee e provvisorie, così come accade per i "*voltage swells*" e le interruzioni.

4.6 Voltage swells

Un "*voltage swell*" è definito come un aumento tra 1.1 pu e 1.8 pu del valore efficace di tensione o corrente alla frequenza fondamentale di esercizio per durate da 0.5 periodo ad un minuto.

Come detto per i "*voltage sags*", i "*voltage swells*" sono di solito associati a fenomeni di corto circuito nel sistema, ma sono meno frequenti dei primi. Un fenomeno che è sicura causa di "*swell*" è dovuto all'incremento di tensione delle fasi non guaste che si ha al verificarsi di un corto circuito monofase a terra; la figura che segue si riferisce appunto a tale fenomeno. Possono essere causati anche dal distacco di un grosso carico o dall'inserzione di banchi di condensatori.
I "*voltage sweels*" sono caratterizzati dalla loro ampiezza (in valore efficace) e dalla loro durata. La gravità di un "*voltage sweel*" di tensione durante una condizione di corto circuito è funzione della posizione del guasto, dell'impedenza equivalente del sistema e della connessione a terra del sistema.

Come noto, in un sistema non connesso a terra, con un'impedenza alla sequenza omopolare infinita, le tensioni rispetto a terra delle fasi non guaste assumono il valore di 1.73 p.u. durante una condizione di guasto monofase a terra. In prossimità di della sottostazione in un sistema connesso a terra, l'incremento della tensione sulle fasi non guaste è nullo o comunque di entità trascurabile. Questo in quanto gli avvolgimenti del trasformatore di sottostazione sono tipicamente del tipo triangolo-stella, e dunque forniscono una richiusura di impedenza molto bassa alle correnti di sequenza omopolare.



Voltage swell causato da un corto circuito monofase a terra

Corto circuiti in diversi punti lungo un sistema a quattro conduttori con connessioni a terra multiple, determinano "*voltage swells*" con diverso grado di severità nelle fasi non guaste.Un "*voltage sweel*" del 15%, come quello mostrato nella figura, è comune sui circuiti di distribuzione dei sistemi del Nord America.

Si precisa, infine, che alcuni autori indicano il *"voltage swell*" con il termine "sovratensione momentanea" ("*momentary overvoltage*").

4.7 Interruzioni

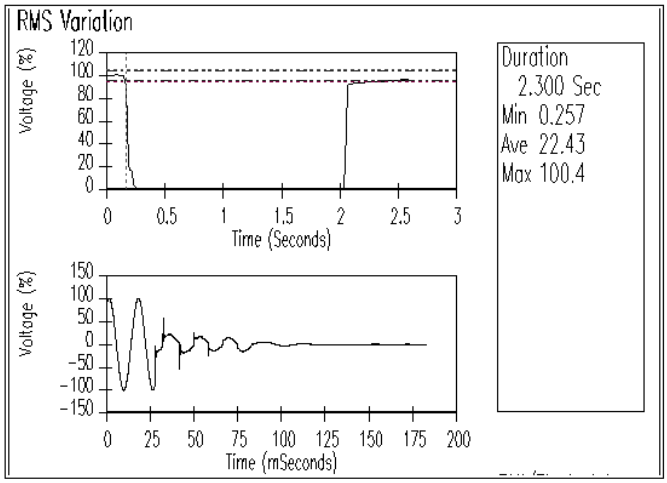
Un'interruzione si verifica quando la tensione di alimentazione o la corrente di carico diminuisce a meno di 0.1 p.u. per un periodo di tempo che non supera 1 minuto.

Le interruzioni possono essere causate da corto circuiti nel sistema di alimentazione, da guasti in apparecchiature di controllo e/o di protezione. Esse sono caratterizzate dalla loro durata, poiché il valore della tensione è, per definizione di interruzione, sempre meno del 10% del suo valore nominale.

La durata di un'interruzione causata da un corto circuito nel sistema di alimentazione è determinata dal tempo di intervento dei sistemi di protezione. La richiusura istantanea generalmente limita l'interruzione causata da un guasto non permanente a meno di 30 periodi. La richiusura ritardata del dispositivo di protezione può causare un'interruzione momentanea o provvisoria.

La durata tipica di un'interruzione causata da malfunzionamenti di apparecchiature di controllo e/o di protezione non è determinabile.

Alcune interruzioni possono essere precedute da una "*voltage sag*" quando queste interruzioni sono causate a guasti nel sistema di alimentazione. Il "*voltage sag*" si verifica, tipicamente, nell'intervallo di tempo che va dal tempo iniziale del guasto al tempo di intervento del sistema di protezione. La figura che segue mostra tale tipologia di interruzione momentanea. Come si vede nella figura, la tensione subisce dapprima un "*voltage sag*" del 20% per almeno tre periodi e poi una interruzione per almeno 1.8 secondi fino a quando il sistema di protezione non richiude.



Interruzione momentanea dovuta all'apertura di un guasto e successiva manovra di richiusura

4.8 Variazioni di tensione di lunga durata

Le variazioni di lunga durata comprendono tutte le modifiche del valore efficace della tensione a frequenza di esercizio che permangono per più di un minuto. Le Norme C84.1 dell'ANSI (*American National Standards Institute)* specifica i limiti di tensione in regime permanente attesi in un sistema di potenza. Una variazione di tensione è di lunga durata se i limiti ANSI sono superati per un tempo maggiore di 1minuto.

Le lunghe variazioni di durata possono essere classificate come:

Sovratensioni ("*overvoltage*");
Sottotensioni ("*undervoltage");*

Interruzioni prolungate (“*sustained interruptions”).*

Generalmente le sovratensioni e le sottotensioni non sono causate da guasti nel sistema, ma sono dovute a variazioni della potenza assorbita dai carichi oppure da operazioni di commutazione sulle linee del sistema. Tali variazioni vengono di solito mostrate con dei diagrammi temporali del valore efficace della tensione.

4.9 Sovratensioni

Una sovratensione è un aumento del valore efficace della tensione maggiore del 110% alla frequenza di esercizio per una durata maggiore di 1 minuto.

Di solito le sovratensioni sono causate da operazioni di sconnessioni di di carichi o dall’inserzione di banchi di condensatori.

4.10 Sottotensioni

Una sottotensione è definita come una diminuzione del valore efficace della a meno del 90% alla frequenza di esercizio che duri più di 1 minuto.

Le sottotensioni sono causate da fenomeni opposti a quelli che originano sovratensioni. L’inserzione di un carico o la disalimentazione di un banco di condensatori può causare una sottotensione fino all’intervento dell’apparecchiatura di regolazione della tensione. Anche condizioni di sovraccarico, infine, possono causare condizioni di sottotensione.

Il termine “*brownout*” è utilizzato spesso per descrivere periodi prolungati di sottotensione; essi originano da una specifica strategia di dispacciamento tesa a ridurre la richiesta di potenza. Si precisa che il termine “*brownout*” non è consigliato poiché non è disponibile alcuna sua definizione formale.

4.11 Interruzioni prolungate

Quando la tensione di alimentazione è nulla per un periodo di tempo superiore ad 1 minuto, la variazione di tensione di lunga durata è considerata un'interruzione prolungata. Le interruzioni di tensione più lunghe di un minuto sono spesso permanenti e richiedono interventi di manutenzione per ripristinare l’esercizio del sistema.

Il termine interruzione prolungata non riferisce a specifici eventi sul sistema di alimentazione e, di solito, non ha alcuna relazione con il termine di fuori servizio.

I distributori utilizzano indifferentemente il temine interruzione prolungata o fuori servizio per descrivere fenomeni di natura simile all’interno dei rapporti di registrazione di eventi legati alla stima dell’affidabilità del sistema. Tale indiscriminazione causa confusione in quanto si pensa sempre ad un fuori servizio per qualsiasi interruzione dell’alimentazione che interrompe un processo produttivo, anche se il fenomeno dura per mezzo periodo.

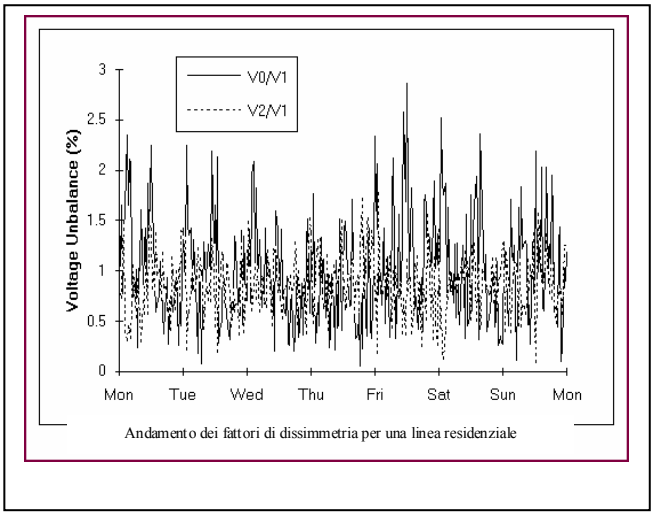
Il fuori servizio, come definito nelle Norme IEEE Std 1008, non si riferisce ad uno specifico fenomeno, ma piuttosto allo stato di un componente in un sistema che non funziona così come dovrebbe secondo le sue caratteristiche nominali.

4.12 .Dissimmetria della tensione

La dissimmetria della tensione è definita talvolta come il rapporto tra il massimo scostamento dalla media delle tensioni di fase ed il valore medio delle stesse, espresso in percentuale.

La dissimmetria, in modo più corretto, può essere definita utilizzando i componenti simmetrici; in tale caso ci si riferisce generalmente al modulo del rapporto tra il componente di sequenza negativa o omopolare ed il componente di sequenza diretta. La figura seguente mostra l'andamento di tali fattori misurati in una settimana su un sistema di tipo residenziale.

La causa principale della dissimmetria delle tensioni di valore entro il 2% è dovuta all'alimentazione di carichi monofase da sistemi trifase. Può anche essere dovuta all'intervento di un unico fusibile posto a protezione di una fase di un sistema trifase di condensatori. Dissimmetrie della tensione più severe (maggiore del 5%) possono derivare da condizioni di esercizio anomale.



Andamento dei fattori di dissimmetria per una linea residenziale

4.13 Deformazione delle forme d'onda

La deformazione delle forme d'onda è definita come lo scostamento permanente dalla forma ideale sinusoidale a frequenza di esercizio caratterizzata principalmente dal contenuto spettrale della forma d'onda deformata.

Ci sono cinque tipi principali di deformazione:

- *"Offset DC*"
- Armoniche;
- Interarmoniche;
- "*Notching"*;
- *"Noise"*.

- *Offset DC*

La presenza di una componente continua di tensione o di corrente in un sistema di alimentazione a corrente alternata è definita "*offset DC"*. Questo può essere originato dal funzionamento di un raddrizzatore a semionda[1].

[1] Talvolta per aumentare la vita utile delle lampade a bulbo incandescente, ad esempio, possono essere impiegati diodi che riducono il valore efficace della tensione mediante un raddrizzamento "a semplice semionda".

Una componente continua di corrente nei sistemi in corrente alternata può avere effetti dannosi per la possibile saturazione dei nuclei dei trasformatori che causa, come noto, l'incremento della loro temperatura di esercizio e, conseguentemente, una riduzione della vita utile.

- *Armoniche*

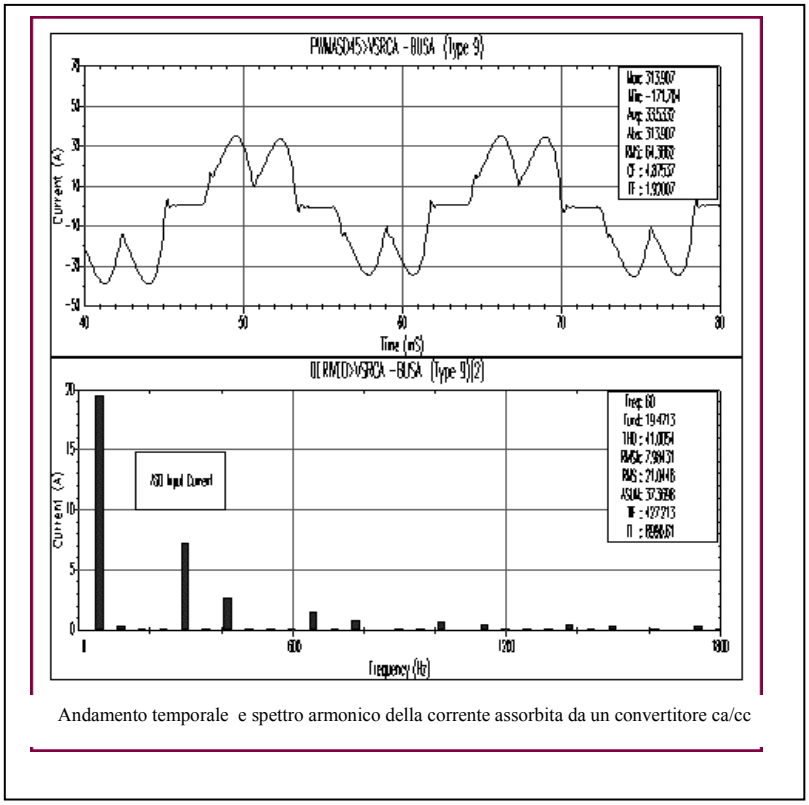
Le armoniche sono componenti di tensione o di corrente sinusoidali che hanno frequenze multiple intere della frequenza fondamentale di esercizio del sistema, di solito 50 Hz o 60 Hz .

Le forme d'onda distorte possono essere scomposte in una somma di componenti alla frequenza fondamentale e alle frequenze armoniche. La deformazione armonica è originata dalla caratteristica non lineare dei convertitori statici.

I livelli di deformazione armonica sono caratterizzati dal valore delle componenti dello spettro armonico in ampiezza e fase; è anche comune impiegare indici complessivi, come il "*Total Harmonic Distortion*" (THD), una grandezza che sinteticamente quantifica il valore della deformazione armonica. La figura illustra la forma d'onda ed il relativo spettro armonico della corrente assorbita da un convertitore ca/cc.

L'impiego e l'interpretazione di indici globali, come il THD sopra richiamato, sono talvolta forieri di indicazioni forvianti.; ad esempio, molti convertitori sono caratterizzati da valori molto elevati di THD di corrente quando sono in funzionamento con carichi molto al di sotto di quello nominale. Tale informazione, apparentemente significativa di una situazione di elevata distorsione, non è necessariamente preoccupante per il ridotto valore assoluto delle componenti armoniche.

Le raccomandazioni IEEE Std. 519-1992 definiscono un ulteriore indice, il "*Total Demand Distortion*" (TDD); esso indica sempre il contenuto armonico della corrente deformata questa volta, però, espresso in percento della massima corrente che il sistema dei carichi assorbe alla frequenza fondamentale di esercizio.



Andamento temporale e spettro armonico della corrente assorbita da un convertitore ca/cc

- *Interarmoniche*

Tensioni o correnti che hanno componenti di frequenza non multipli interi della frequenza fondamentale di esercizio (50 Hz o 60 Hz) sono deformate per la presenza di interarmoniche

Le interarmoniche possono essere presenti in sistemi di tutte le categorie. Le principali origini sono gruppi i convertitori statici di frequenza statici, i cicloconvertitori, i forni ad arco. Inoltre possono essere viste come componenti interarmoniche anche le portanti di segnalamento spesso usate nei sistemi di potenza.

Gli effetti delle interarmoniche vanno dalle interferenze sui sistemi di segnalamento al fenomeno del "*flicker*", di cui si dirà in seguito.

- *"Notching"*

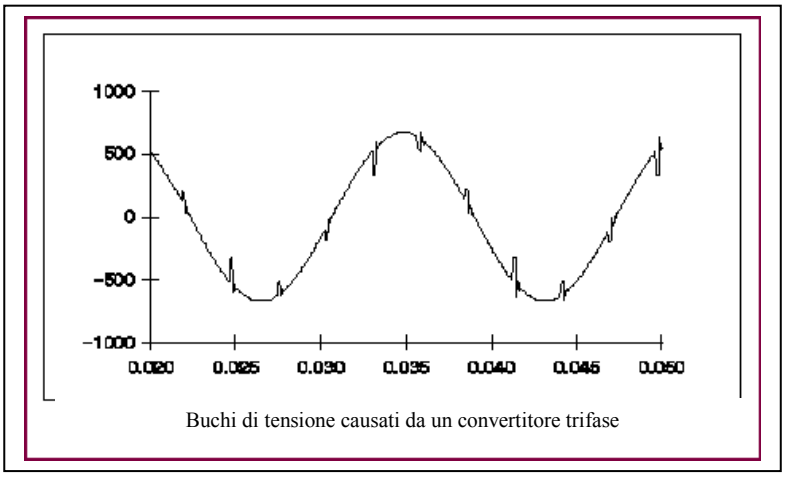
Il *"notching"* è un disturbo periodico della tensione causato dal normale funzionamento dei convertitori statici, quando la corrente è commutata da una fase all'altra. Poiché il "*notching*" si verifica continuamente, esso potrebbe essere caratterizzato mediante lo spettro armonico della tensione deformata. Tuttavia, le corrispondenti componenti sono tipicamente a frequenza molto alta e le usuali apparecchiatura di misura utilizzate per analisi armonica non sono in grado di rilevarle.

La figura seguente mostra un esempio di "*voltage nothcing*" causato da un sistema di conversione trifase a sei pulsazioni. I buchi di tensione si verificano in corrispondenza della commutazione di corrente da una fase all'altra che, come noto, rappresenta un corto circuito che porta la tensione di fase a valori tanto più bassi quanto è minore l'impedenza equivalente del sistema.

- *Noise*

Il *"noise*" è definito come un segnale di contenuto spettrale di ampia banda in frequenza (fino a 200 kHz) sovrapposto alla componente alla frequenza fondamentale.

Genericamente, si parla di *"noise"* per indicare qualsiasi deformazione delle



Buchi di tensione causati da un convertitore trifase

grandezze elettriche che non può essere classificata come deformazione armonica o interarmonica

Il fenomeno del *"noise*" può essere causato da dispositivi elettronici, da circuiti di controllo, da apparecchiature ad arco, da raddrizzatori statici, da alimentatori *switching*.

I fenomeni di "*noise*" sono spesso acuiti da connessioni a terra non efficaci che, appunto, non riescono a derivare a terra i disturbi. Diverse sono le apparecchiature sensibili ai fenomeni di "*noise"*, ad esempio molti dispositivi elettronici come microcomputer oppure i controllori programmabili.

4.14 Fluttuazioni di tensione

Le fluttuazioni di tensione sono variazioni sistematiche dell'inviluppo della forma d'onda di tensione o, anche, una serie di variazioni casuali della tensione , la cui ampiezza normalmente non supera l'intervallo che va da 0.9 p.u. a 1.1 p.u. (Norme ANSI C84.1 d).

Le Norme IEC 555-3 definiscono diversi tipi di fluttuazioni di tensione.; ci si limita in questa sintetica analisi solo quelle definite dalle IEC 555-3 come tipo(d). Esse sono caratterizzate come una serie di fluttuazioni di tensione casuali o continue.

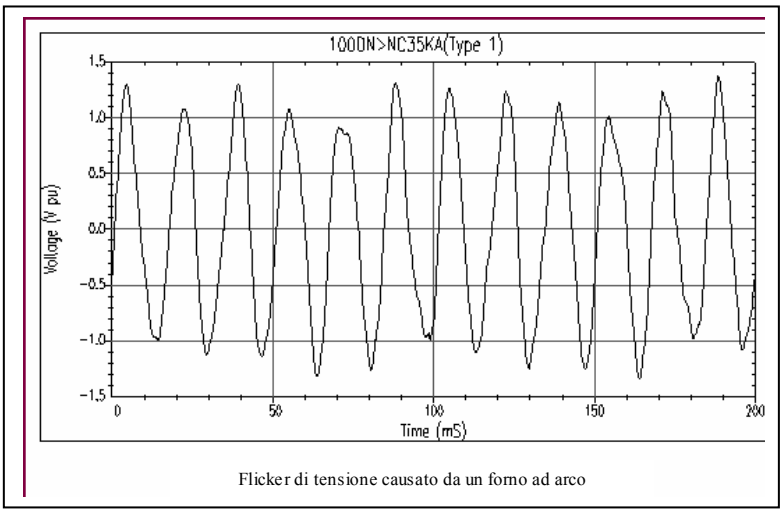
Variazioni continue e rapide di corrente assorbita da alcuni carichi determinano a loro volta fluttuazioni della tensione genericamente indicata come "*flicker*". Il fenomeno del *"flicker"* è riferito all'effetto che la fluttuazione di tensione ha sulle lampade. Esse, se alimentate da una tensione affetta da fluttuazione, emettono un flusso luminoso la cui intensità è anch'essa fluttuante e viene percepita come uno "sfarfallio" fastidioso dall'occhio umano.

In realtà, la fluttuazione della tensione è un fenomeno elettromagnetico mentre il "flicker" è il suo effetto negativo su alcuni carichi alimentati, in particolare sulle lampade.

Nella figura seguente viene mostrato un esempio di una forma d'onda di tensione affetta da una evidente fluttuazione. Il fenomeno riportato in figura è causato da un forno ad arco, una delle cause più comuni di fluttuazione della tensione sui sistemi di trasmissione di e di distribuzione.

Il flicker è caratterizzato dal valore efficace della grandezza espressa in percentuale della fondamentale.

Il flicker viene misurato con riferimento alla sensibilità dell'occhio umano. Tipicamente ampiezze fino allo 0.5% possono dar luogo ad un effetto flicker percettibile dall'occhio umano se le frequenze sono nella gamma di 6-8 Hz.



Flicker di tensione causato da un forno ad arco

4.15 Variazioni di frequenza

Le variazioni di frequenza sono definite come le deviazioni della frequenza di esercizio del sistema dal suo valore nominale (50 Hz o 60 Hz).

La frequenza di esercizio è strettamente connessa alla velocità di rotazione dei generatori che alimentano il sistema ed, in particolare, l'entità delle variazioni di frequenza e la loro durata dipendono dalle caratteristiche del carico alimentato, dal sistema e dalla risposta del sistema di controllo dei generatori alle variazioni di carico.

Variazioni di frequenza che vanno fuori da limiti accettati per le normali condizioni di regime possono essere causate da corto circuiti nel sistema di trasmissione, dalla disalimentazione di una sezione cospicua di carichi, o anche dal fuori servizio di unità di generazione.

Nei moderni sistemi, che sono sempre più interconnessi, sono rare variazioni di frequenza significative. Le variazioni di frequenza di conseguenza sono molto di più probabili nei sistemi isolati.