

CONVERTITORI STATICI DI BASSA E MEDIA TENSIONE (RADDRIZZATORI, CONVERTITORI DI FREQUENZA, INVERTITORI): NORME E SPECIFICHE

E. Bassi, E. Dallago, M. Da Ros

SOMMARIO

I documenti che regolano i rapporti tecnici e commerciali tra i costruttori e gli utilizzatori di convertitori statici di energia elettrica non sempre risultano adeguati alle necessità. Le norme non possono, il più delle volte e per loro natura, venire in aiuto al progettista dell'impianto nel definire caratteristiche e prestazioni delle macchine da utilizzare.

Nella memoria vengono descritti i compiti delle specifiche, i parametri minimi da fornire e le prestazioni da richiedere sia per quanto riguarda le grandezze elettriche sia per quanto riguarda le grandezze ambientali e di interfacciamento.

Si analizza, successivamente, lo stato attuale delle norme, in campo sia nazionale sia comunitario, evidenziando quanto le stesse, vista la complessità dell'argomento e l'eterogeneità dei sistemi considerati, non possano essere ritenute autonomamente sufficienti a specificare le caratteristiche di un convertitore statico di energia elettrica.

1. INTRODUZIONE

L'utilizzazione diffusa dei convertitori di energia risale ai primi anni sessanta ed è stata dovuta alla comparsa sul mercato dei semiconduttori di potenza quali i diodi al silicio e i tiristori (SCR). Il progettista di impianti elettrici che prevedeva, a quei tempi, di utilizzare dei convertitori, sia per ottenere energia elettrica in forme diverse da quelle convenzionali, sia per alimentare motori elettrici per ottenere energia meccanica, non aveva l'esperienza e la documentazione necessarie per determinare accuratamente, in fase di definizione delle specifiche, le prestazioni che queste macchine dovevano fornire. Tantomeno esistevano norme a cui riferirsi per determinare la compatibilità del convertitore con il resto dell'impianto e per eseguire collaudi di accettazione che garantissero alla committenza di avere acquistato un prodotto adeguato alle esigenze tecnologiche del proprio impianto. Il progettista si limitava a rivolgersi a fornitori qualificati confrontando le loro proposte ed esaminando le pubblicazioni tecniche disponibili.

Tuttavia, in conseguenza della crescente necessità di variare i parametri dell'energia elettrica nascevano all'inizio degli anni '70, nell'ambito delle più grosse società di ingegneria, specifiche appositamente sviluppate per i convertitori statici. Le esigenze tecniche da cui traggono origine sono perfettamente identificabili: se il convertitore è destinato all'alimentazione di un impianto elettrico si nota la propensione al dettaglio degli organi di manovra, della struttura meccanica e della strumentazione di misura. Se esso è invece destinato all'alimentazione di motori elettrici si nota la presenza di riferimenti a protezioni e precauzioni proprie di schemi in cui non era previsto l'inserimento di un convertitore. Se, per ultimo, il convertitore è destinato all'alimentazione di sofisticati apparati elettronici, si nota un ridondante dettaglio degli schemi, delle tecnologie e dei componenti da utilizzare per il suo sviluppo.

Contemporaneamente, gli enti normatori nazionali ed internazionali abbozzavano norme di collaudo, norme di compatibilità elettromagnetica e raccomandazioni per la corretta applicazione al settore specifico delle norme esistenti sulla sicurezza operativa.

È del tutto attuale il problema di determinare i limiti delle specifiche e delle norme in questo particolare campo.

2. NORME E SPECIFICHE

La norma, in questo come in altri settori, viene emanata per tutelare la sicurezza degli operatori delle macchine, per garantire l'investimento dell'acquirente e per determinare la compatibilità dell'apparecchiatura con l'ambiente che la circonda. La norma non può essere vista come manuale di applicazione o come manuale di progettazione, ma determina semplicemente quanto la tecnologia è stata in grado di esprimere alla data della sua pubblicazione. La norma consolida uno stato di fatto e sicuramente non anticipa e non limita il progresso, così come non può ovviamente prevedere tutte le condizioni funzionali ed operative di un complesso impianto tecnologico. Essa può sicuramente aspirare a rendere più omogenee e compatibili le diverse apparecchiature presenti nel medesimo impianto. La norma può, in larga maniera, determinare le metodologie da applicare nella valutazione di conformità di un'apparecchiatura alle necessità della committenza e può sicuramente consolidare convenzioni, metodologie e consuetudini che

si sono creati nel tempo, rendendoli di uso comune. Deve, assolutamente, garantire che nella progettazione dei vari componenti e degli impianti, vengano tutelate la vita e la salute delle persone che dovranno con essi operare.

Il confine tra norma e specifica risulta in tutti i settori di difficile definizione: più un prodotto è maturo e più la norma è in grado di dettagliarlo. Ovviamente, più un prodotto è semplice, più è facile individuarne le caratteristiche salienti e definire le prove da effettuare per dichiararlo conforme a quanto stabilito dalla norma stessa. Questa affermazione è testimoniata, per altri settori dell'elettrotecnica e dell'elettronica, dagli sviluppi che le norme hanno subito. Ad esempio, per quanto riguarda i componenti primari degli impianti, quali le protezioni contro le sovracorrenti (fusibili e interruttori automatici), le protezioni contro le sovratensioni (scaricatori e varistori), gli organi di manovra (interruttori e contattori), i trasformatori, i condensatori, i semiconduttori, ecc., le norme hanno, a tutt'oggi, coperto settori che nel passato erano di competenza delle specifiche.

Per quanto riguarda i convertitori statici, il loro recente sviluppo e la notevole complessità della materia ha sollevato problemi precedentemente sconosciuti o ignorati in quanto ininfluenti sull'impianto, quali ad es. l'iniezione di armoniche di corrente nella rete elettrica. Di conseguenza è necessario capire quanto la norma ha fatto finora e quanto potrà fare nel futuro per costituire un valido aiuto al progettista. È necessario inoltre stabilire le competenze del progettista d'impianto per affrontare lo studio di sistemi che utilizzano convertitori statici. Questo per evitare sia la richiesta di prestazioni praticamente impossibili da ottenere, sia la realizzazione di sistemi di costo elevato, difficilmente gestibili e inutilmente ridondanti. Infine è necessario capire quando la norma, in tempi di rapida evoluzione tecnologica, perda progressivamente di validità sino ad essere abbandonata.

3. IL COMPITO DELLE SPECIFICHE

È compito delle specifiche definire in maniera esauriente le prestazioni che una macchina dovrà fornire per poterla correttamente utilizzare nell'impianto come previsto dal progettista.

È intuitivo che per ottenere delle specifiche che rendano praticamente realizzabile qualsiasi macchina, sia necessaria, almeno in prima istanza, la stretta collaborazione tra il progettista della macchina ed il progettista dell'impianto in cui essa dovrà operare. Non per questo tuttavia la specifica dovrà risentire in maniera prevalente delle esigenze di una delle due parti e tantomeno il progettista dell'impianto, quale principale utente delle specifiche, dovrà sostituirsi al progettista della macchina ed averne le competenze.

Nel caso dei convertitori di energia, vista la complessità e la pluralità delle macchine, si può frequentemente incorrere in dettagli eccessivi che appartengono più all'ambito della progettazione della macchina che non a quella della progettazione dell'impianto.

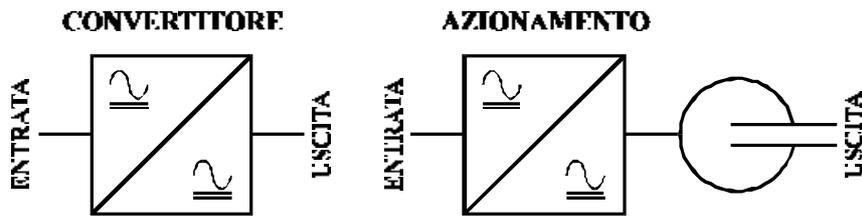


Fig. 1 - Convertitore ed azionamento

Considerando nel seguito un qualsiasi convertitore statico come un generico quadripolo con due morsetti di entrata e due di uscita (si noti che questi ultimi possono non erogare energia elettrica ma energia meccanica), è necessario determinare con il maggior dettaglio possibile i parametri sotto definiti.

3.1 Parametri elettrici di entrata

Per la sorgente in corrente alternata o continua che alimenta un generico convertitore statico è necessario specificare i seguenti dati:

- valore della tensione, suoi limiti statici e dinamici e numero delle fasi (se corrente alternata)
- dissimmetria delle fasi (se corrente alternata)
- valore della frequenza e suoi limiti statici e dinamici (se corrente alternata)
- modalità di gestione del neutro e della terra (PE) (se corrente alternata)
- modalità di gestione delle polarità e delle terra (PE) (se corrente continua)
- corrente presunta di cortocircuito ai morsetti del convertitore
- massimo valore della distorsione armonica della forma d'onda di tensione (se corrente alternata)
- residuo alternativo presente (se corrente continua)
- fattore di potenza accettato dall'impianto
- massimo valore della distorsione armonica della forma d'onda di corrente accettato dall'impianto (se corrente alternata)
- massimo valore del residuo alternativo di corrente accettato dall'impianto (se corrente continua)
- massimo squilibrio di carico accettato dall'impianto (se corrente alternata)
- valori e durata dei buchi di tensione e fluttuazioni (flicker)
- coordinamento con altre protezioni presenti nell'impianto a monte.

Tab. 1 - Parametri elettrici di entrata

PARAMETRI ELETTRICI DI ENTRATA	Unità	CONVERTITTORE				AZIONAM.	
		CA/CC	CA/CA	CC/CC	CC/CA	CC	CA
valore della tensione	V	X	X	X	X	X	X
limiti statici	%	(±15)	(±15)	(±15)	(±15)	(±15)	(±15)
limiti dinamici	%	(±25)	(±25)	(±25)	(±25)	(±25)	(±25)
numero delle fasi	m	X	X			X	X
dissimmetria delle fasi	rad	(±0,1)	(±0,1)			(±0,1)	(±0,1)
valore della frequenza	Hz	X	X			X	X
limiti statici	%	(±1)	(±1)			(±1)	(±1)
limiti dinamici	%	(±5)	(±5)			(±5)	(±5)
modalità di gestione del neutro		X	X			X	X
modalità di gestione della polarità				X	X		
modalità di gestione della terra		X	X	X	X	X	X
corrente presunta di cortocircuito	kA	X	X	X	X	X	X
distorsione della tensione fornita	THD%	X	X			X	X
residuo alt. della tensione fornita	V			X	X		
fattore di potenza accettato	cosφ	X	X			X	X
distorsione di corrente consentita	THD%	X	X			X	X
residuo alt. di corrente consentito	A			X	X		
squilibrio di carico consentito	%	X	X			X	X
valore dei buchi di tensione	%	X	X	X	X	X	X
durata dei buchi di tensione	s	X	X	X	X	X	X
valore della fluttuazione	%	X	X	X	X	X	X
durata della fluttuazione	s	X	X	X	X	X	X
coordinamento protezioni a monte		X	X	X	X	X	X

X = Applicabilità

(±nn) = Tolleranze consigliate

3.2 Parametri di uscita

Come premesso, i convertitori sono utilizzati secondo due diverse finalità: 1) alimentazione di apparati elettrici; 2) alimentazione di motori elettrici (azionamenti) dei quali consentono la regolazione delle grandezze meccaniche. Poiché la distinzione comporta notevoli differenze dal punto di vista costruttivo e delle prestazioni, è preferibile separare, nella specifica, i parametri elettrici da rispettare (validi per entrambi i casi) ed i parametri meccanici da soddisfare nel caso di azionamenti.

3.2.1 Parametri elettrici

La definizione dei parametri elettrici determina la compatibilità tra il convertitore ed i carichi utilizzatori che esso alimenta. Una corretta analisi di questi dati modifica in larga parte la qualità di tutto l'impianto elettrico alimentato, definita come la capacità di fornire energia elettrica agli utilizzatori rispettando parametri adeguati alle funzioni che essi devono svolgere. Si noti che la qualità risulta insoddisfacente sia quando alcune prestazioni non raggiungono i requisiti minimi, sia quando risultano esuberanti; il costo, elevato quando si fanno delle scelte esuberanti, è indice di scarsa qualità. Un impianto elettrico realizzato con elevata qualità deve comprendere ciò che è necessario e solo

l'analisi approfondita delle richieste dell'utente finale è l'elemento fondamentale a garanzia che la scelta del necessario coincida con quanto richiesto.

Nella fase iniziale di progettazione, per analizzare quanto un impianto elettrico sia adeguato alle richieste degli utilizzatori, è necessario introdurre alcuni parametri di riferimento; essi possono essere divisi nelle categorie così definite.

Parametri primari:

- potenza apparente continuativa e transitoria necessaria per gli utilizzatori
- potenza attiva continuativa necessaria per gli utilizzatori
- valore della tensione, suoi limiti statici e dinamici e numero delle fasi (se corrente alternata)
- dissimmetria delle fasi in funzione dello squilibrio del carico (se corrente alternata)
- valore della frequenza e suoi limiti statici e dinamici (se corrente alternata)
- minimo valore del fattore di potenza ammesso (se corrente alternata)
- massimo valore della distorsione armonica di corrente prodotta dagli utilizzatori (se corrente alternata)
- massimo valore della distorsione armonica della forma d'onda con carico lineare e non lineare che può essere accettata dagli utilizzatori (se corrente alternata)
- massimo valore del residuo alternativo ammesso (se corrente continua)
- massimo tempo ammesso durante il quale gli utilizzatori accettano una alimentazione al di fuori dei parametri primari
- massimo valore di indisponibilità, inteso come numero di interruzioni di alimentazione dell'energia elettrica agli utilizzatori, in funzione del tempo.

Parametri derivati:

- impedenza di cortocircuito del convertitore alla frequenza fondamentale (se corrente alternata)
- resistenza di cortocircuito del convertitore (se corrente continua)
- modalità di gestione del neutro e della terra (PE) (se corrente alternata)
- modalità di gestione delle polarità e della terra (PE) (se corrente continua)
- tempo medio al primo guasto del convertitore (MTTF)
- tempo medio tra guasti accettato dagli utilizzatori (MTBF)
- tempo medio di riparazione del convertitore che verrà richiesto in funzione della complessità dell'impianto (MTTR)

Tab. 2 - Parametri di uscita

PARAMETRI DI USCITA	Unità	CONVERTITTORE				AZIONAM.	
		CA/CC	CA/CA	CC/CC	CC/CA	CC	CA
ELETTRICI PRIMARI							
potenza apparente continuativa	VA		X		X		X
potenza apparente transitoria	VA		X		X		X
potenza attiva continuativa	W	X	X	X	X	X	X
valore della tensione	V	X	X	X	X	X	X
limiti statici tensione	%	X	X	X	X	X	X
limiti dinamici tensione	%	X	X	X	X	X	X
numero delle fasi	m		X		X		X
dissimmetria delle fasi	rad		X		X		X
valore della frequenza	Hz		X		X		X
minimo fatt. di potenza del carico	cosφ		X		X		X
massima distorsione di corrente	THD%		X		X		X
distorsione di tensione ammessa							
con carico lineare	THD%		X		X		X
con carico non lineare	THD%		X		X		X
massimo residuo altern. ammesso	V	X		X		X	
massimo tempo fuori parametri	s	X	X	X	X	X	X
valore indisponibilità	1/h	X	X	X	X	X	X
ELETTRICI DERIVATI							
impedenza di cortocircuito	%		X		X		X
resistenza di cortocircuito	%	X		X		X	
modalità di gestione del neutro			X		X		X
modalità di gestione della polarità		X		X		X	
tempo medio al primo guasto	h	X	X	X	X	X	X
tempo medio tra guasti	h	X	X	X	X	X	X
tempo medio di riparazione	h	X	X	X	X	X	X
MECCANICI							
potenza massima continuativa	W					X	X
potenza massima transitoria	W					X	X
quadranti di funzionamento	n					X	X
campo di velocità dell'albero	rad/s					X	X
tolleranze statiche	%					X	X
tolleranze dinamiche	%					X	X
coppia in funzione della velocità	Nm					X	X
residuo armonico coppia motrice	THD%					X	X
residuo armonico coppia resist.	THD%					X	X
momento di inerzia del carico	kgm ²					X	X
diagramma di accelerazione	m/s ²					X	X
tipo di elementi di accoppiamento						X	X
tipo di elementi di rotolamento						X	X
tipo di ventilazione						X	X

X = Applicabilità

(±nn) = Tolleranze consigliate

3.2.2 *Parametri meccanici nel caso di azionamenti*

Il caso dei convertitori statici destinati all'alimentazione di motori elettrici - azionamenti - richiede la definizione di valori specifici legati al comportamento all'albero motore. La presenza di quest'ultimo modifica però l'importanza di alcuni parametri di uscita rispetto al caso di convertitori destinati all'alimentazione di impianti elettrici.

Normalmente l'azionamento controlla direttamente grandezze meccaniche quali la velocità, l'accelerazione e la coppia motrice. Per tenere conto del motore nel sistema di regolazione dell'azionamento è necessario specificare i seguenti dati:

- potenza massima continuativa e transitoria necessaria all'albero
- quadranti di funzionamento
- frenatura a recupero
- campo di velocità all'albero e sue tolleranze statiche e dinamiche
- diagramma della coppia in funzione della velocità
- residuo armonico della coppia motrice
- residuo armonico della coppia resistente
- momento d'inerzia del carico
- diagramma di accelerazione
- caratterizzazione degli elementi di accoppiamento e rotolamento
- tipo di ventilazione

3.3 **Parametri ambientali**

Fondamentali per il suo corretto funzionamento sono le condizioni ambientali in cui l'apparecchiatura verrà installata, le quali possono venire classificate come segue.

3.3.1 *Condizioni climatiche*

Ogni apparecchiatura elettrica installata in un impianto viene sottoposta, nella sua vita, a sollecitazioni climatiche sia in regime di funzionamento sia in condizioni di immagazzinaggio (scorte ridondanti). È necessario quindi specificare i seguenti dati:

- temperatura e umidità relativa di immagazzinaggio
- temperatura e umidità relativa dell'ambiente in cui il sistema opera
- ciclo termico giornaliero e stagionale
- aggressività chimica e polverosità dell'atmosfera
- pericolosità dell'atmosfera (per eventuale costruzione antideflagrante)
- quota, sul livello del mare, di installazione
- grado minimo di protezione degli involucri.

3.3.2 *Condizioni di sollecitazione termica*

In funzione della necessità che elementi del sistema possano venire in contatto con il personale addetto alla sua gestione e della esigenza di ottenere elevati valori di affidabilità dei materiali utilizzati è necessario, nella maggior parte dei casi, specificare i seguenti dati:

- sovrelevazione di temperatura degli organi di comando manuale
- margine di sovrelevazione di temperatura dei componenti utilizzati
- tipo di raffreddamento (naturale, ad aria forzata o a liquido refrigerante)
- gradiente di temperatura tra entrata ed uscita dell'aria di raffreddamento
- condizioni nominali di funzionamento del circuito termico
- ciclo di raffreddamento.

3.3.3 *Condizioni di sollecitazione meccanica esterna*

Ogni apparecchiatura elettrica installata in un impianto può venire sottoposta, nella sua vita, a sollecitazioni meccaniche esterne dovute al trasporto iniziale, alla installazione, a fenomeni non ricorrenti quali scosse sismiche e in genere a fenomeni elettrici anomali che provocano sollecitazioni meccaniche ai morsetti e ai barraggi. È necessario quindi specificare i seguenti dati:

- tipo e modalità dei mezzi utilizzati nel sollevamento e trasporto
- tipo e modalità di ancoraggio dell'apparecchiatura
- vibrazioni e sollecitazioni previste nel luogo di installazione espresse in ampiezza e accelerazione
- sollecitazioni meccaniche legate alla temperatura
- sollecitazioni meccaniche ad alta e a bassa frequenza.

3.3.4 *Parametri di emissione acustica*

In funzione del luogo di installazione e della presenza, in esso o nei pressi, di persone, viene determinato il massimo livello di emissione acustica dell'apparecchiatura. Questo valore può essere espresso in diversi modi a seconda dall'eventuale insonorizzazione dell'ambiente, È necessario quindi specificare i seguenti dati:

- emissione acustica, espressa in dB, secondo curve predeterminate da normative esistenti, a distanze prefissate
- incremento dell'emissione sonora, espressa con i metodi sopraccitati, misurata nel luogo più vicino dove si prevede la presenza di persone.

3.3.5 *Parametri di emissione radioelettrica e sensibilità alle radiointerferenze*

Pur essendo questi parametri normalmente contemplati nell'ambito della compatibilità elettromagnetica (EMC) è preferibile trattarli separatamente rispetto ai problemi di compatibilità elettrica precedentemente illustrati. È inoltre preferibile valutare allo stesso modo, e quindi nello stesso ambito, tutto quanto riguarda le emissioni prodotte dal convertitore nell'ambito della radiofrequenza (da 150 kHz sino a 30 MHz secondo EN 50081-1 e EN 50081-2) con la sua sensibilità funzionale a emissioni prodotte (secondo EN 50082-1 e EN 50082-2) da altri apparati che operano nel suo stesso ambiente. Infatti specifiche azioni correttive si dimostrano spesso efficaci per la soluzione di entrambi i problemi. È necessario quindi definire i seguenti dati:

- limiti di emissione del disturbo condotto espressi in dB valore medio
- limiti di emissione del disturbo irradiato espressi in dB valore medio
- limiti di immunità ai disturbi condotti
- limiti di immunità ai disturbi irradiati

3.4 **Sicurezza operativa e manutentiva**

Il problema della sicurezza, intesa come garanzia dell'incolumità delle persone che operano nel contesto della macchina, diffusamente trattato dalle norme e dalle leggi nazionali, comunitarie ed internazionali, riveste particolare importanza per il settore dei convertitori.

Data la complessità di questo tipo di macchine è preferibile distinguere i due casi della sicurezza operativa e di quella manutentiva.

3.4.1 *La sicurezza operativa*

È l'insieme di tutte quelle precauzioni atte a garantire l'incolumità delle persone preposte alla conduzione operativa della macchina o che comunque possono venire in contatto con la stessa.

Le norme per il settore dei quadri elettrici, sia di bassa sia di media tensione, sono, sull'argomento degli involucri (IEC-144 IEC-529), sufficientemente esaurienti. Bisogna comunque tenere presente alcuni particolari aspetti:

- grado di protezione richiesto
- tipo di raffreddamento ammesso
- quantità di calore da smaltire
- massima temperatura prevista dell'ambiente
- minima temperatura prevista dell'ambiente.

Mentre per i quadri elettrici convenzionali, dotati solo di apparecchi di manovra, comando, protezione e interruzione, le quantità di calore prodotte dai macchinari sono generalmente modeste rispetto alle capacità naturali di smaltimento dei quadri, nel caso dei convertitori le quantità di calore possono anche essere rilevanti.

Risulta in alcuni casi impossibile garantire il raffreddamento naturale di convertitori di media potenza (>50 kVA) con grado di protezione dell'involucro superiore a IP2XX. In altri casi, per i vincoli associati all'assemblaggio meccanico dei semiconduttori di potenza commutati ad elevate frequenza (sistemi PWM), è necessario adottare la ventilazione forzata. Bisogna comunque dire che generalmente le esigenze del raffreddamento naturale dipendono unicamente da richieste di elevata affidabilità dell'intero sistema.

3.4.2 *La sicurezza manutentiva*

Particolare attenzione va posta alla sicurezza manutentiva. A differenza delle condizioni operative normali in condizioni di manutenzione si possono creare, nei convertitori, particolari situazioni di pericolo. Nella fase di manutenzione, soprattutto straordinaria a causa di un guasto, può risultare necessario operare in tensione ad involucro aperto. Bisogna quindi prevedere quanto segue:

- possibilità di effettuare il by-pass del convertitore attraverso un quadro separato, se è necessario garantire la continuità del servizio
- gradi di protezione sufficientemente elevati per i componenti interni al quadro del convertitore (almeno IP1XX)
- la posizione degli elementi non accessibili dall'esterno, che si possa comunque ipotizzare una loro manutenzione, tale da non pregiudicare l'incolumità del personale
- chiara indicazione, a mezzo di cartelli segnalatori, degli elementi che possono rimanere in tensione.

Una particolare menzione va fatta per i convertitori connessi a batterie di accumulatori (UPS). Infatti il recente utilizzo di accumulatori ermetici con elevate tensioni in corrente continua (>400 V), posti all'interno dei quadri del convertitore, può trarre in inganno il personale di manutenzione. Pur disponendo di un quadro separato di by-pass in corrente alternata, la presenza di questa sorgente secondaria mantiene in tensione alcuni circuiti interni ai quadri. A questo proposito sono allo studio norme particolari citate successivamente.

3.5 Interfaccia con l'operatore

Qualsiasi apparecchiatura elettrica, direttamente o indirettamente, deve interagire con il personale addetto alla sua conduzione e manutenzione. Nel caso dei convertitori statici si possono trovare nella condizione in cui la macchina è autonomamente interfacciata con l'operatore ed altri in cui essa dipende da sistemi più complessi che provvedono a questa funzione. Nel primo caso, la presenza di strumentazione, comandi e segnalazioni locali richiede di specificare i seguenti dati:

- grandezze significative da misurare
- tipo di strumentazione da utilizzare
- comandi da predisporre
- segnalazioni di stati e presenze
- allarmi locali connessi con relè o soglie di misura.

A questo particolare proposito è importante sottolineare la necessità di non eccedere nelle dotazioni di strumentazione e segnalazioni al fine di non creare confusione al personale, soprattutto in casi di emergenza. L'utilizzazione di sistemi automatici di misura e supervisione locali, disponibili oggi a costi relativamente contenuti, può, anche in questo caso, risultare di difficile comprensione in quanto le grandezze rilevate sono visibili singolarmente, senza fornire una visione globale del comportamento del sistema. Meglio è, in questi casi, installare un sistema esperto che provveda, con una propria logica, ad evidenziare con semplici segnali luminosi, acustici e messaggi in chiaro, la presenza di una anomalia nel convertitore. Va comunque tenuto presente che, in alcuni casi, la presenza di programmi molto complessi e di non facile collaudo, vista la natura anomala delle condizioni da verificare, può risultare un punto debole per tutto il sistema.

3.6 Interfaccia di supervisione e controllo

Quando il convertitore viene inserito in sistemi più complessi, che ne prevedono la gestione e il controllo, è indispensabile specificare le grandezze analogiche e gli stati funzionali che interagiscono tra le diverse apparecchiature. L'utilizzo degli elaboratori elettronici e dei controllori programmabili negli impianti elettrici richiede, in alcuni casi, che il convertitore sia in grado di colloquiare con essi tramite segnali digitali conformi a particolari specifiche. È necessario quindi, per tutti i casi, specificare, i seguenti dati:

- modalità e protocolli di trasmissione
- grandezze elettriche rilevate
- grandezze elettriche controllate
- stati funzionali rilevati e resi disponibili al processo
- stati funzionali controllati dal processo esterno.

Si noti in particolare che devono essere dettagliatamente specificati le modalità, i protocolli e le convenzioni di stato.

3.7 Documentazione

È parte integrante di qualsiasi macchinario la documentazione ad essa allegata: è quindi necessario, in qualsiasi specifica, determinare con chiarezza quale ne dovrà essere il corredo minimo richiesto.

È compito del progettista dell'impianto determinare, in comune accordo con chi lo dovrà gestire, il grado di dettaglio di ogni documento richiesto anche tenendo conto dalla

preparazione tecnica del personale di gestione, di quello di manutenzione e della complessità del sistema. Nello specifico campo dei convertitori statici si danno casi in cui gli operatori ed i manutentori non hanno nessuna competenza in materia (tipici sono i gruppi di continuità utilizzati nell'automazione di ufficio) ed altri invece in cui l'utilizzatore ha addestrato il personale addetto per specifiche funzioni (tipici sono gli azionamenti destinati alla trazione elettrica). Nei due casi la documentazione dovrà essere totalmente diversa e la specifica dovrà essere formulata di conseguenza. È anche da tenere presente la riluttanza, per ragioni di proprietà industriale, di alcuni fornitori nel divulgare documentazione di tipo particolare. Si riporta di seguito il contenuto minimo della documentazione da richiedere per i casi più complessi.

3.7.1 *Documentazione di progetto*

Destinata al progettista dell'impianto deve comprendere:

- disegni di ingombro e disposizione quadri
- distinta dei pesi, carichi specifici e baricentri
- disegni per il progetto di fondazioni e ammaraggi
- schemi unifilari con evidenziate morsettiere, cavi o sbarre di interconnessione quadri, loro sezione e numerazione.

3.7.2 *Documentazione di installazione*

Destinata a personale qualificato deve comprendere:

- disegni di ingombro e disposizione quadri
- disegni per la costruzione di eventuali fondazioni o ammaraggi
- schemi funzionali
- disegno delle morsettiere per le connessioni esterne.

3.7.3 *Documentazione di avviamento*

È compito generalmente dell'installatore provvedere alla prima messa in funzione. Poiché è una delle fasi più critiche dell'intera fornitura la specifica può, nel caso di convertitori particolarmente complessi, espressamente richiedere l'intervento del costruttore della macchina. La documentazione necessaria deve comprendere:

- sequenze di verifica delle connessioni esterne
- sequenze di avviamento in condizioni normali
- sequenze di arresto in condizioni normali
- sequenze di arresto in condizioni anormali
- elenco ridotto di prove funzionali.

3.7.4 *Documentazione di gestione*

Questa può essere più o meno dettagliata in funzione della complessità della macchina e del personale a cui si rivolge ma deve almeno comprendere i seguenti elementi:

- descrizione sintetica delle funzioni svolte dal convertitore e suo schema unifilare
- descrizione sintetica del suo inserimento nell'impianto o nel processo
- sequenze di avviamento in condizioni normali
- sequenze di arresto in condizioni normali
- operazioni da svolgere in caso di anomalia o guasto.

3.7.5 Documentazione di manutenzione ordinaria e straordinaria

Nel caso in cui la manutenzione sia svolta da personale qualificato della committenza, risulta di primaria importanza la disponibilità di tutta la documentazione tecnica sia elettrica sia meccanica. Oltre ai documenti citati in precedenza essa dovrà comprendere:

- schemi elettrici dettagliati di ogni singolo assieme o sottoassieme
- distinte componenti con riferimenti puntuali ad ogni singolo elemento
- dati, tolleranze ed equivalenze per ogni singolo componente sostituibile
- elenco cavi con relativa numerazione
- viste o disegni topografici dei quadri, assiami e sottoassiami.

Per quanto riguarda la manutenzione ordinaria è sufficiente la rappresentazione di una tabella da utilizzare con periodicità prefissata (settimanale, mensile, trimestrale o annuale in funzione del tipo di convertitore) su cui annotare le principali grandezze da rilevare.

Per quanto riguarda la manutenzione straordinaria la documentazione necessaria è la seguente:

- descrizione di funzionamento di ogni singolo assieme o sottoassieme facendo riferimento puntuale ai relativi schemi elettrici
- descrizione dei probabili guasti che si possono riscontrare (anomalie esterne, interventi di soglie, interruttori automatici o fusibili, situazioni di allarme, ecc.)
- possibili cause del guasto e relative azioni correttive.

3.7.6 Documentazione del software utilizzato

La crescente utilizzazione, nei sistemi elettronici di potenza, di elementi programmabili (dispositivi logici programmabili PLD, microprocessori e controllori programmabili PLC), ha evidenziato il problema della documentazione software da allegare al prodotto fornito. Esistono, a questo proposito, alcuni limiti da tenere in considerazione:

- tipo di sistema programmabile utilizzato
- linguaggio utilizzato nella programmazione
- proprietà intellettuali rivendicate dal fornitore.

Il tipo di sistema programmabile utilizzato determina, in molti casi, il linguaggio utilizzato per la sua programmazione e quest'ultimo determina la possibilità del dialogo diretto con i componenti (hardware). Ciò significa che il linguaggio acquisirà e controllerà direttamente, senza l'interposizione di altro software interprete o traduttore, l'elemento hardware interessato. Più il linguaggio è prossimo al componente, più esso sarà complesso e specializzato per il sistema utilizzato. Bisogna comunque dire che la rinuncia ad un software interprete (sistema operativo), che renderebbe il prodotto di uso e comprensibilità generali, è normalmente dovuta ad esigenze di velocità, prestazioni e riservatezza. A quest'ultimo proposito è necessario dire che le rivendicazioni sulla proprietà intellettuale del prodotto, da parte del fornitore, hanno una loro logica giustificazione. Prima dell'avvento dei sistemi programmabili, il costruttore poteva profondere i propri sforzi e le proprie capacità intellettuali nella progettazione del macchinario (difficilmente imitabile), mentre oggi tutti gli sforzi sono dedicati allo sviluppo del software che, se ben documentato, risulta di facile riproduzione. Una buona documentazione del software utilizzato dovrebbe almeno comprendere le seguenti voci:

- tipo di sistema programmabile utilizzato
- elenco degli ingressi acquisiti e delle uscite controllate (I/O-list)

- diagramma di flusso del processo (Flow-chart)
- diagramma strutturato degli stati normali
- diagramma strutturato degli stati anormali
- descrizione funzionale dell'interfaccia uomo-macchina (Menu)
- linguaggio utilizzato nella programmazione
- dettaglio del programma (Program-list)
- elenco delle soglie, livelli e temporizzazioni riprogrammabili dall'utente.

3.7.7 Documentazione del sistema interno di diagnostica guasti

Come precedentemente esposto, la semplice installazione di un sistema di acquisizione dati, non corredato di una propria logica elaborativa, può essere un limite ad una corretta conduzione e manutenzione del convertitore. Si consideri che la progressiva diffusione dei sistemi esperti richiederà d'altra parte la definizione di una completa documentazione che dettagli il loro comportamento per le diverse condizioni possibili. In prima analisi, essi possono essere così classificati:

- sistemi autonomi
- sistemi interattivi
- sistemi attivi
- sistemi passivi

Un sistema diagnostico autonomo non interagisce con altri sistemi simili, di pari livello o superiore. Provvede alla presentazione, nei confronti degli operatori, di informazioni sul comportamento del convertitore.

Un sistema interattivo comunica le proprie informazioni ad altri sistemi simili, di pari livello o superiore, che, dopo averle elaborate, potranno comunicare ad esso parametri o comportamenti da assumere.

Un sistema attivo, in funzione della diagnosi effettuata, agisce sul convertitore, modificandone i parametri e i comportamenti.

Un sistema passivo, generalmente autonomo, non agisce sul convertitore.

Vista la casistica possibile, è facile incontrare sistemi misti, parzialmente autonomi su alcune funzioni, interattivi su altre ed attivi su altre ancora. È necessario quindi che la documentazione allegata al convertitore preveda quanto segue:

- elementi o circuiti del convertitore interessati alla diagnosi
- tipo di sistema ed interazioni previste
- tipo e frequenza delle interazioni con altri sistemi
- comportamenti del sistema e di eventuali sistemi interattivi all'anomalia
- comportamenti del sistema e di eventuali sistemi interattivi nelle diverse situazioni di pericolo
- comportamento degli operatori nelle diverse situazioni

3.8 Specifiche di prova e collaudo

I collaudi del convertitore rivestono una particolare importanza per la corretta conclusione del contratto commerciale tra fornitore e committente. Garantiscono inoltre che quanto è stato prescritto dal progettista dell'impianto sia conforme alle necessità del processo servito.

Le relative specifiche possono essere normalmente divise in tre parti: prove di tipo, collaudi in fabbrica e collaudi sull'impianto. L'importanza dei diversi momenti non è univocamente definibile: in alcuni casi (per esempio alimentatori, gruppi di continuità e

convertitori di frequenza di piccola o media potenza) la possibilità di simulare tutte le condizioni elettriche di alimentazione e tutte le condizioni di uscita fa assumere al collaudo in fabbrica rilevanza totale. In altri casi (per esempio azionamenti per trazione elettrica) è necessario svolgere in eguale peso e misura sia il collaudo in fabbrica sia, per ovvie ragioni, il collaudo sull'impianto.

Una considerazione a parte va fatta per le prove di tipo, che sono costituite dalle prove svolte sui prototipi ed accettate successivamente in produzione senza necessità di ripetizioni. Esse includono prove distruttive per i componenti in esecuzione a sicurezza aumentata (AD), prove distruttive di tenuta elettrica degli isolamenti, prove climatiche, prove sismiche, prove di radiazione nucleare, ecc..

Una particolare attenzione andrà posta alla verifica, in fabbrica o sull'impianto, della conformità e dell'affidabilità dell'eventuale software utilizzato.

Con riferimento ai due tipi di collaudo citati sarà necessario specificare quanto segue.

3.8.1 Collaudo in fabbrica

- prove, per quanto applicabili e a macchina ferma, di isolamento e rigidità dielettrica
- prove, per quanto applicabili e con macchina in funzione, di suscettibilità elettromagnetica
- rilievo dei dati di uscita in condizioni di assenza di carico al variare dei parametri di entrata
- rilievo dei dati di uscita in condizioni di pieno carico e sovraccarico al variare dei parametri di entrata
- rilievo dinamico dei dati di uscita all'inserzione di gradini di carico a determinate condizioni dei parametri di entrata
- verifica funzionale degli organi di manovra e comando
- verifica funzionale di soglie, allarmi e protezioni
- verifica del software utilizzato.

diagnostici, di simulare completamente situazioni di guasto che possono essere distruttive per lo stesso convertitore, aggiunge ulteriori ostacoli alla completa verifica di conformità di quanto fornito.

Per le ragioni su esposte, le specifiche di collaudo, del software di gestione e diagnosi, dovrebbero almeno comprendere:

- descrizione commentata dell'analisi del diagramma di flusso
- descrizione commentata del programma e riferimenti al diagramma di flusso
- descrizione degli stati stabili
- descrizione degli stati dinamici per ogni evento
- versione del software e suoi precedenti collaudi
- elenco delle modifiche apportate rispetto all'ultima versione collaudata
- prove funzionali degli stati stabili
- prove funzionali degli stati dinamici
- prove funzionali delle condizioni di guasto
- prove di comunicazione con sistemi connessi
- prove dell'interfaccia uomo-macchina
- prove di comportamento anomalo degli operatori esterni (a prova di stupido).

Vista la complessità del problema, sono in corso di pubblicazione e di studio norme specifiche per il collaudo del software industriale. Uno sforzo ulteriore viene richiesto alle aziende produttrici al fine di provvedere autonomamente alla loro auto certificazione secondo le norme EN29000 (ISO9000).

4. ANALISI DETTAGLIATA DEI PARAMETRI RICHIESTI

Come detto nei precedenti paragrafi, la stretta collaborazione tra il progettista della macchina e quello dell'impianto è condizione necessaria per compilare delle specifiche che permettano la realizzazione di convertitori adeguati sia dal punto di vista tecnologico sia impiantistico. La prima condizione ne permette una corretta costruzione, la seconda un corretto utilizzo. Tuttavia questo non sempre è possibile a causa delle specifiche competenze o a causa della insufficiente considerazione che viene data al problema elettrotecnico del convertitore. Anche la specifica materia, parte di dominio dell'elettrotecnica, parte dell'elettronica di potenza, ha portato sovente a incomprensioni tra le parti interessate. Si cercherà per questo di capire dove il processo di analisi alcune volte si confonde, producendo specifiche inattendibili o in alcuni casi incomprensibili; si preferisce per questo utilizzare, se del caso, le classificazioni precedentemente esposte.

4.1 Parametri elettrici di entrata

La sorgente in entrata viene spesso vista dal progettista della macchina come una fonte di potenza infinita, con impedenze o resistenze proprie trascurabili, dalla quale è possibile prelevare energia con qualsiasi forma d'onda di corrente ed in quantità esuberanti. Questo fatto, tra l'altro autolesionistico, crea notevoli problemi in quanto le reti hanno un proprio limite di potenza, una propria impedenza e non è possibile prelevare da esse energia incondizionatamente senza che esse manifestino una "reazione", la quale si evidenzia in scompensi che limitano la funzionalità degli stessi

apparati che l'hanno provocata. Frequente è il caso di convertitori per azionamento di motori, installati in un medesimo impianto elettrico ed alimentati dalla stessa cabina di trasformazione, che tendono a sincronizzarsi alimentando le utenze in maniera "gemella" indipendentemente dai propri sensori e dai propri anelli di regolazione. Questo fatto è normalmente dovuto alle commutazioni degli SCR o dei diodi del convertitore di potenza maggiore, che provocano sovracorrenti nella linea di alimentazione. Il valore finito della sua impedenza provoca cadute di tensione transitorie (della durata di qualche centinaia di microsecondi) che si ripercuotono in modo negativo sulla funzionalità del convertitore di potenza minore. Si noti che, fenomeni di questo tipo, possono non manifestarsi in fase di collaudo, per la presenza di una sorgente di alimentazione con caratteristiche diverse da quella dell'impianto.

È giusto quindi parlare di "ecologia elettrica" quale metodo di autocensura al fine di non arrecare danno ad altri e nemmeno a se stessi. Non è nemmeno pensabile di delegare ad altri, "super partes" (quale potrebbe essere la società elettrocommerciale), il compito di bonificare le reti al fine di garantire sempre una corretta fornitura dell'energia elettrica. Perde quindi di significato ogni pretesa di qualità nella fornitura se, accanto all'impegno che può e deve dare il distributore, non sussiste un pari impegno da parte dell'utenza, che potrà giustamente vantare un più alto livello di "qualità attesa" solo quando avrà fatto la propria parte in termini di scelta e organizzazione complessiva del proprio impianto e dei propri apparati.

4.2 Parametri elettrici di uscita

Quanto riportato nel precedente paragrafo, visto dal lato utilizzatore, può essere esteso, nei casi in cui il convertitore (per esempio gruppo di continuità) alimenti altri apparecchi elettrici, al lato generatore. Il convertitore viene spesso visto dal progettista dell'impianto come una sorgente convenzionale con impedenze o resistenze tipiche di una cabina elettrica MT/BT o nel caso in corrente continua di una batteria di accumulatori, dalla quale è possibile prelevare incondizionatamente energia. Al contrario l'utilizzo di convertitori influenza la progettazione e l'analisi:

- del sistema di distribuzione a valle
- della capacità di alimentare carichi distorcenti
- della capacità di alimentare carichi con elevate correnti di avviamento.

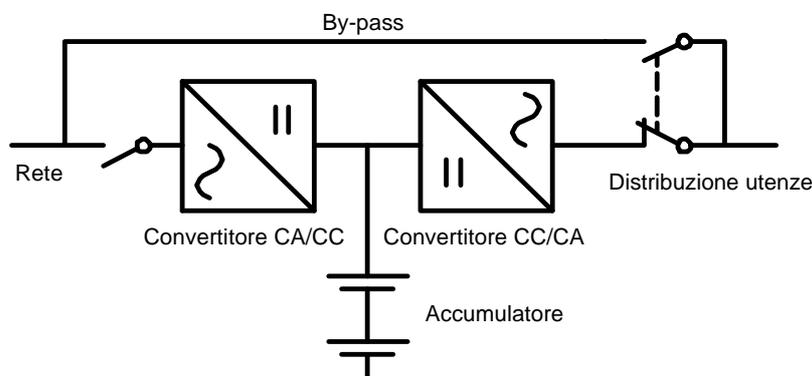


Fig. 2 - Gruppo statico di continuità

Per quanto riguarda il dimensionamento del sistema di distribuzione a valle, sorgono problemi nell'applicazione degli usuali metodi di selettività amperometrica e cronometrica degli interruttori magnetotermici. L'interruttore generale, installato sulla linea di alimentazione lato convertitore, in caso di cortocircuito sulle sbarre principali, potrebbe non intervenire in quanto la corrente non è sufficiente a provocare l'intervento del relè magnetico. Occorre dimensionare correttamente il valore di taratura del più grande interruttore a valle in funzione della corrente nominale dello stesso convertitore. In mancanza di una corrente di cortocircuito elevata, in caso di guasto su una linea di alimentazione, la selettività di tipo cronometrico non è applicabile ed il tempo prolungato di eliminazione del guasto provoca il possibile propagarsi a monte del guasto stesso. Questo rende vana la funzione delle protezioni, e la mancanza di tensione, agli altri utilizzatori non in cortocircuito, compromette l'affidabilità del sistema.

Un carico distorto in corrente alternata fa circolare nel sistema di alimentazione, oltre alla corrente fondamentale, correnti a frequenza multipla e causa la distorsione della tensione. Conseguentemente l'alimentazione dei carichi distorti, presenti negli utilizzatori di tipo elettronico, è possibile se il valore della corrente di picco assorbita non supera il valore di limitazione della corrente della macchina. Entro tale limite (circa 1,5 volte il valore della corrente massima efficace), l'impedenza di cortocircuito del convertitore è relativamente bassa (circa 5% del valore di massimo carico). Questa caratteristica si riscontra in particolare nei convertitori a transistori con modulazione a larghezza di impulso. L'impedenza di cortocircuito del convertitore assume valori prossimi al 50% dell'impedenza di carico qualora il valore della corrente di picco assorbita tenda a superare il valore di limitazione della corrente di macchina. Questo tipo di comportamento è dovuto alla presenza di elementi semiconduttori che non ammettono sovracorrenti transitorie salvo sovradimensionamenti eccessivi.

In caso di alimentazione di carichi con elevate correnti di avviamento si constata che la maggior parte delle macchine elettriche ed elettroniche provoca, all'inserzione, una sovracorrente di durata variabile da pochi millisecondi a qualche secondo. Ad esempio, un motore asincrono trifase, all'avviamento con piena tensione, fa circolare una corrente pari a circa 6 - 7 volte il valore massimo nominale per un tempo che varia, in pratica, secondo la relazione approssimata:

$$t_a = \frac{G \cdot d^2 \cdot n}{375 \cdot C_a}$$

con $G \cdot d^2$ l'inerzia delle masse rotanti complessive in kgm^2
 n il numero dei giri nominali della macchina
 C_a la coppia accelerante media in Nm (pari alla differenza tra la coppia motrice del motore e la coppia resistente della macchina accoppiata).

E' buona norma, in queste condizioni di avviamento, che la caduta di tensione ai morsetti del motore non sia superiore al 15% del valore nominale. Poiché la caduta di tensione è proporzionale all'impedenza di cortocircuito del generatore, risulta che tale impedenza non debba superare circa il 4%. Conseguentemente è necessario dimensionare il convertitore in modo che all'inserzione di qualsiasi utenza ad esso collegata non si superi una corrente di picco pari al 150% della corrente massima da esso erogabile.

5. LO STATO ATTUALE DELLE NORME

5.1 Generalità

In generale, le norme hanno lo scopo di definire, rispetto ad un determinato settore applicativo e tecnologico, i mezzi comuni di espressione (terminologia, unità di misura, ecc.), i metodi per definire le prestazioni ed i metodi di prova, le prescrizioni per la sicurezza delle persone, le prescrizioni per la garanzia di un livello minimo di qualità del prodotto, le regole che interessano l'intercambiabilità elettrica o meccanica.

Gli organismi normatori si possono distinguere a seconda dell'ambito di applicabilità delle norme da esse emanate. Pertanto si hanno: 1) norme aziendali, dirette a stabilire criteri e dettagli normalizzati all'interno di una singola impresa industriale; 2) norme settoriali, utilizzabili da un gruppo di aziende con attività simili, oppure per prodotti destinati ad uno specifico settore di mercato; 3) norme nazionali, che prescrivono determinati requisiti in relazione alle specifiche tecniche, alla sicurezza delle persone, alla tutela del consumatore ecc.; 4) norme internazionali, che hanno come obiettivo l'unificazione e l'armonizzazione per favorire gli scambi di prodotti e di tecnologia tra nazioni diverse.

In ogni Paese, vincolanti dal punto di vista giuridico, sono le norme nazionali che in Italia vengono emanate dal CEI; ad esse fa riferimento il D.P.R. 186 (1968) che impone l'esecuzione "a regola d'arte" dei prodotti e degli impianti elettrici ed elettronici. In ambito europeo, le norme emanate dal CENELEC sono vincolanti per i Paesi aderenti, tra cui l'Italia, secondo tre modalità: 1) Norme Europee (EN), il cui contenuto deve essere adottato dagli stati membri entro una data definita, eventualmente abolendo le norme nazionali in contrasto con esso, e che non possono essere unilateralmente modificate; 2) Documenti di armonizzazione (HD), il cui contenuto deve essere recepito entro una data stabilita adeguando le norme nazionali, ma può essere soggetto a modifiche rispetto al testo di riferimento; 3) Prenorme europee (ENV), a carattere sperimentale e durata limitata nel tempo, che riguardano solitamente settori in rapida evoluzione. Dal 1985 è poi in vigore in ambito normativo la politica nota come "nuovo approccio", la quale affida a direttive comunitarie il compito di stabilire i requisiti fondamentali relativi alla sicurezza ed alla protezione dell'ambiente e del consumatore, mentre lascia ad altri enti di accreditamento e certificazione l'incarico di definire e garantire le caratteristiche dei prodotti. In ambito internazionale, le norme IEC costituiscono, per i Paesi aderenti, un modello secondo il quale deve essere informata la normativa nazionale, ma non sono giuridicamente vincolanti. Si ricorda comunque che il rispetto di una data normativa, es. norme CEI, esonera dall'onere della prova del rispetto delle leggi; al contrario, la mancata osservanza impone di dimostrare che le scelte tecniche conseguenti non sono in contrasto con le disposizioni di legge.

Nel settore dell'elettronica di potenza e dei convertitori statici, le norme più complete sono state definite in ambito IEC, ad opera del Comitato Tecnico (TC) 22 (Power Electronics) cui fanno capo a loro volta i sottocomitati SC 22B (Semiconductor Converters), SC 22D (Electronics Power Converters for Rolling Stocks, che si occupa del materiale rotabile), SC 22E (Stabilized Power Supplies, alimentatori stabilizzati), SC 22F (Converters for HVDC Power Transmission, per la trasmissione di energia in continua), SC 22G (Semiconductor Power Converters for Adjustable Speed Electric

Drive Systems, per gli azionamenti a velocità variabile). I sottocomitati si organizzano in Gruppi di Lavoro (WG) che affrontano argomenti più specifici; in particolare, per il TC 22G il WG1 si occupa di 'Harmonic and Reactive Power Compensation and Network Compatibility', il WG2 di 'Adjustable Voltage D.C. Drive Systems' ed il WG3 di 'Adjustable Frequency A.C. Drive Systems'. Altri Comitati Tecnici hanno attinenza con i convertitori e le loro applicazioni; tra questi in particolare il TC 77 (Electromagnetic Compatibility between Electrical Equipment Including Networks, per la compatibilità elettromagnetica).

In generale le norme CEI, quando esistono, sono uguali alle corrispondenti norme CENELEC, oppure simili, se non rigorosamente uguali, a quelle emanate dal corrispondente comitato tecnico IEC. Ad esempio la normativa sui sistemi statici di continuità (UPS) è rappresentata dalla CEI 74-4 che recepisce integralmente la EN 50091-1; in ambito IEC le 146-4 e 146-5 trattano rispettivamente delle specifiche di prestazioni, dei metodi di prova e degli elementi di commutazione interni ad un UPS.

5.2 Norme sui convertitori statici e l'elettronica di potenza

Una rassegna esauriente della normativa in questo settore è riportata in bibliografia. Di seguito sono richiamate alcune tra le norme principali sui convertitori, la cui conoscenza è ormai diventata indispensabile per il progettista di impianti elettrici.

IEC 50-551 International Electrotechnical Vocabulary: Power Electronics (1982): definisce termini e grandezze interessanti l'ambito dell'elettronica di potenza.

IEC 146-1 1/2/3 Semiconductor Convertors (1991): relativa ai convertitori con commutazione naturale (non necessariamente da rete); definizioni, requisiti dei convertitori, prove sui componenti e prestazioni dei convertitori, trasformatori e reattori per l'alimentazione dei convertitori di potenza.

IEC 146-2 Semiconductor Self-Commutated Convertors (1974): relativa ai convertitori a commutazione forzata, o che comunque comprendano una sezione a commutazione forzata: in particolare inverter.

IEC 146-3 Semiconductor Direct D.C. Convertors (1977): relativa ai convertitori continua/continua (chopper) senza stadio intermedio in alternata.

IEC 146-6: relativa alla scelta dei fusibili per la protezione dei semiconduttori di potenza.

IEC 1136-1 Semiconductor Power Convertors - Adjustable Speed Drive Systems-General Requirements (1992): definisce le specifiche generali per gli azionamenti, con speciale riferimento a quelli con macchine in corrente continua.

Le norme italiane sono quelle preparate dal CT 22 del CEI e comprendono, oltre alla recente (1992) traduzione del capitolo sull'elettronica di potenza del Vocabolario Internazionale IEC, una norma (22-2) generale sui convertitori a semiconduttore per applicazioni industriali e di trazione, una serie di norme sugli alimentatori stabilizzati con uscita in corrente continua (22-3/4/5) ed una norma specifica (22-6) sui convertitori per trazione.

A titolo di esempio, e per confronto con il paragrafo 3.2, vengono di seguito riportati i valori nominali dei parametri d'uscita per gli inverter, definiti, secondo le IEC 146-2, per condizioni di servizio nominali e ciclo continuo di funzionamento.

Per inverter a frequenza fissa:

- tensione d'uscita e suoi limiti di variazione

- corrente per un fattore di potenza dato
- frequenza e sua tolleranza
- contenuto armonico massimo relativo alla tensione d'uscita con un carico lineare resistivo (solo per inverter ad onda sinusoidale).

Inoltre, se possibile, devono essere definiti:

- squilibrio ammesso per il carico
- relazione tra lo squilibrio del carico e lo squilibrio della tensione
- campo consentito per il fattore di potenza
- variazioni transitorie della tensione e tempo di assestamento che si manifestano per una variazione brusca della corrente di carico
- fattore di conversione (rapporto tra la potenza fondamentale d'uscita e d'ingresso) e/o rendimento.

Nel caso di inverter a frequenza variabile, ad es. per l'alimentazione di motori in alternata, devono essere inoltre forniti i campi di variazione della tensione, della frequenza e del fattore di potenza.

Analogamente, la definizione delle condizioni di servizio comprende:

- temperatura ambiente
- temperatura dell'eventuale liquido refrigerante
- quota
- energia transitoria di alimentazione
- variazione sulla tensione di ingresso
- ondulazione residua sulla tensione di alimentazione
- armoniche sulla tensione di ingresso
- sovratensioni di alimentazione

Inoltre, tra le condizioni che devono essere identificate dall'utilizzatore:

- condizioni ambientali (aria salata, variazioni brusche di temperatura, polveri abrasive ecc.)
- condizioni meccaniche (vibrazioni anomale, condizioni non usuali di stoccaggio ecc.)
- condizioni elettriche (cicli di lavoro inconsueti, carichi non lineari, ecc.)

6. CONCLUSIONI

L'insieme dei documenti comprendenti specifiche e norme per i convertitori statici di potenza è molto vasto ed articolato.

Parte da testi messi a punto da aziende nazionali pubbliche e private, da Enti normativi nazionali e stranieri e si arricchisce dei lavori redatti da organismi in collaborazioni internazionali europei ed extraeuropei.

Il numero notevole di questi documenti evidenzia l'importanza del settore, l'ampio numero di applicazioni in ambienti diversi e la relativa giovinezza del settore che ha portato ad affrontare problemi nuovi e complessi.

Nella memoria si è cercato di fornire al progettista di impianti elettrici una visione d'insieme delle specifiche da richiedere per l'utilizzo di un convertitore statico nelle diverse applicazioni. Tali specifiche devono mettere il progettista nelle condizioni

di poter assicurare le prestazioni dell'impianto, la sua sicurezza ed affidabilità e le condizioni opportune per la compatibilità elettromagnetica e i radiodisturbi.

L'applicazione del convertitore in settori particolari, quali ad esempio la trazione ferroviaria, richiede un approccio diverso. Infatti in questo caso il progettista dell'azionamento è lo stesso che ha partecipato al progetto del convertitore, al quale sono quindi ben note le relative specifiche.

I principali documenti di norme relative ai convertitori statici, richiamati in questo lavoro, costituiscono un utile riferimento per il progettista. La normativa deve però essere sempre vista come fattore di promozione e sviluppo delle moderne tecnologie. Quest'ultima considerazione deve portare a capire quando una norma sia superata, in tutto od in parte, ed a proporre una nuova che risolva i problemi lasciati aperti dalla precedente.

7. BIBLIOGRAFIA

- [1] G. CORBELLINI, F. TOMMAZZOLI: "Esigenze dei carichi e scelta degli schemi, del macchinario e degli apparecchi per la rete elettrica negli ospedali" - Corso di aggiornamento su problemi attuali nel progetto degli impianti elettrici di energia; Università di Pavia, 22-25 Giugno 1992
- [2] P. BAIONI, G. FERELLA FALDA, C. FOSSATI, M. CACCIA: "Continuità del servizio: commutazioni automatiche, distacco carichi nei servizi ausiliari delle centrali termoelettriche e negli impianti industriali" - Università di Pavia Corso di aggiornamento 1989; 19-22 Giugno
- [3] L. FELLIN: "Scelta dei gruppi per alimentazioni di emergenza e di continuità" - Università di Pavia Corso di aggiornamento 1989; 19-22 Giugno
- [4] FIAMM S.p.A.: Catalogo accumulatori al Piombo stazionari e accumulatori al Piombo ermetici.
- [5] G. SICILIANO, P. LOMBARDO: "Impiego dei gruppi e dei sistemi di continuità per un centro di telecomunicazioni - problemi connessi" - Convegno AEI, Milano, 30 Marzo 1989
- [6] D. DA ROS: "Invertitore di potenza a tiristori ad onda sinusoidale con stabilizzazione a ferro saturo" - Rendiconti Annuali AEI 1973, memoria B23
- [7] G. BELLATO, M. CACCIA, G. CEUDEK, M. LANTERI: "Progetto della protezione selettiva di una rete industriale di bassa tensione" - Università di Pavia Corso di aggiornamento 1989; 19-22 Giugno
- [8] S. BERNO, B.L. COLOMBO, F. LEONE: "Apparecchiature statiche per la regolazione della potenza reattiva e della tensione (SVS) e per la compensazione delle armoniche" - Università di Pavia Corso di aggiornamento 1989; 19-22 Giugno
- [9] M. CACCIARI, C.F. CHIZZOLINI, M. LOGGINI, G.C. MONTANARI: "Un approccio statistico al problema delle armoniche di tensione e corrente negli impianti elettrici" - Convegno AEI, Milano, 30 Marzo 1989
- [10] L. BIANCO, M. GIORGI, P. VEZZANI: "Macchine rotanti: alternatori, motori asincroni e sincroni" - Università di Pavia Corso di aggiornamento 1989; 19-22 Giugno
- [11] M. CACCIA, P. VEZZANI: "Impianti industriali con richiesta di elevata continuità dell'alimentazione e per impianti con richiesta di elevata disponibilità" - Corso di aggiornamento su apparecchi, macchine e impianti elettrici; Università di Pavia, 10-13 Giugno 1991
- [12] G. CORBELLINI, G. RIVOLI: "L'affidabilità degli impianti di sicurezza e di riserva - Norme giuridiche e tecniche" - I° convegno tecnico "Le caratteristiche degli impianti di sicurezza e di riserva" I.S.P.E.L.S., Roma 25 Marzo 1992
- [13] D. DA ROS, M. DA ROS: "Sistemi di continuità e loro impiego negli ospedali" - Giornate di studio su: "Affidabilità e sicurezza degli impianti elettrici negli ospedali" AEI, Milano, 7 Giugno 1979
- [14] M. DA ROS, G. BACILE: "I gruppi di continuità rotanti negli impianti elettrici: quando, come e perché utilizzarli" AEI, Palermo, 27-28 Ottobre 1992
- [15] L. FELLIN: "I disturbi negli impianti elettrici utilizzatori: effetti e provvedimenti migliorativi" - Convegno AEI, Verona, 25-26 Novembre 1993

- [16] R. LAMEDICA, E. TIRONI, D. ZANINELLI: "I convertitori statici nell'analisi dei disturbi armonici: loro rappresentazione ed impatto con il sistema elettrico" - Convegno AEI, Verona, 25-26 Novembre 1993
- [17] M. DA ROS, G.C. FAVA, G. RIVOLI: "Problemi tecnici ed economici nell'utilizzazione dei gruppi di continuità statici e rotanti in ambito terziario ed industriale" - Convegno AEI, Verona, 25-26 Novembre 1993
- [18] E.BASSI, E. DALLAGO, G. PETRECCA; "Impiego dei convertitori di potenza" - Università di Pavia Corso di aggiornamento 1983; 20-25 Giugno.
- [19] A. DELL'AQUILA, V. GILIBERTI, A. SKOFF: "Le norme sugli azionamenti elettrici nell'ambito del sistema normativo nazionale ed europeo"; Seminario Interattivo su "Azionamenti Elettrici con Controllo a Microprocessore", Bressanone, Marzo 1994
- [20] C. ATTAIANESE: "L'azionamento elettrico: un sistema in cerca di una normativa."; Seminario Interattivo su "Azionamenti Elettrici con Controllo a Microprocessore", Bressanone, Marzo 1994.
- [21] M. MARESCA, G.P. OTTAVIANI, S. PORETTA, G.D. TESTI: "Aspetti della normativa nel campo dell'elettronica di potenza"; AEI, Vol. 81, n° 2, Febbraio 1994, pagg. 74-82.
- [22] D. HAMELS: "Certification of electrical drives (or their suppliers) and its importance to the user"; First European Conference on "Reliability, Standardization and Certification of Industrial Drives. Milano, Maggio 1992.
- [23] V. VACCARO: "An Introduction to Standardization"; Ibid.
- [24] T. OHTANI: "Standardization of Inverter Drives for Industrial Application"; Ibid.

INDICE

	SOMMARIO	2
1.	INTRODUZIONE	3
2.	NORME E SPECIFICHE	3
3.	IL COMPITO DELLE SPECIFICHE	4
3.1	Parametri elettrici di entrata	5
3.2	Parametri di uscita	6
3.3	Parametri ambientali	9
3.4	Sicurezza operativa e manutentiva	10
3.5	Interfaccia con l'operatore	12
3.6	Interfaccia di supervisione e controllo	12
3.7	Documentazione	13
3.8	Specifiche di prova e collaudo	16
4.	ANALISI DETTAGLIATA DEI PARAMETRI RICHIESTI	18
4.1	Parametri elettrici di entrata	18
4.2	Parametri elettrici di uscita	19
5.	LO STATO ATTUALE DELLE NORME	21
5.1	Generalità	21
5.2	Norme sui convertitori statici e l'elettronica di potenza	22
6.	CONCLUSIONI	24
7.	BIBLIOGRAFIA	25