



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI TECNICA E GESTIONE DEI SISTEMI INDUSTRIALI

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA MECCANICA E MECCATRONICA
CURRICULUM MECCATRONICO

TESI DI LAUREA TRIENNALE

Accumulo dell'energia negli impianti di produzione da fonti rinnovabili

Relatore: Prof. DIEGO DAINESE

Laureando: RAFFAELE DI FIORE

Matricola: 1011903

ANNO ACCADEMICO 2013-2014

SOMMARIO

L'elaborato tratta le problematiche legate alla sicurezza elettrica che coinvolge il sistema di accumulo dell'energia da fonti rinnovabili attraverso processo elettrochimico.

Dapprima verranno esposte le principali tecnologie attualmente sul mercato, fornendo un'analisi del funzionamento e la descrizione dei vantaggi e svantaggi ad esse correlati.

In seguito si entrerà nel dettaglio attraverso la trattazione di una decina di norme nazionali e internazionali relative alle prescrizioni minime e i metodi di prova che i singoli prodotti e il sistema devono rispettare per essere considerati realizzati a regola d'arte.

Il testo includerà l'esposizione di alcune tematiche strettamente collegate agli aspetti produttivi, un approfondimento ritenuto di rilevante importanza per conoscere al meglio i prodotti utilizzati e per poterne fare un uso corretto al momento della progettazione e dell'installazione.

Successivamente verranno analizzate le misure di sicurezza da adoperare per rendere l'intero sistema sicuro, grazie all'impiego e al dimensionamento di protezioni esterne.

Il risultato finale è un vademecum che introduce le conoscenze di base per tutti coloro che vogliono avvicinarsi alla tematica del sistema di accumulo trattato in questo documento.

INDICE

Indice delle figure, grafici e tabelle	vii
Capitolo 1 - Introduzione	1
Capitolo 2 - Il sistema di accumulo	3
2.1 Batterie	4
2.1.1 Batteria al piombo-acido	6
2.1.2 Batteria al litio	9
2.1.3 Batteria sodio-cloruro di nickel	10
2.2 Regolatore di carica	11
2.2.1 Regolatore di carica PWM	11
2.2.2 Regolatore di carica per batterie al litio	12
2.2.3 Regolatore di carica MPPT	13
2.3 Battery Management System (BMS)	14
2.4 Convertitore DC/AC	14
Capitolo 3 - Principi di sicurezza elettrica	17
3.1 Scossa elettrica	18
3.2 Pericoli relativi all'energia	18
3.3 Incendio	18
3.4 Pericoli chimici	19
3.5 Sommario	19
Capitolo 4 - Normativa CEI EN 60896 - Batterie di accumulatori stazionari al piombo	21
4.1 Normativa CEI EN 60896-11 - Batterie del tipo aperto	21
4.1.1 Capacità	21
4.1.2 Durata	22
4.1.3 Corrente di cortocircuito e resistenza interna	22
4.2 Normative CEI EN 60896-21 e CEI EN 60896-22 - Tipi regolate con valvole	23
4.2.1 Emissione di gas	23
4.2.2 Tolleranza a correnti elevate	24
4.2.3 Operatività delle valvole	24
4.2.4 Vita operativa a 40°C	25
4.2.5 Scarica eccessiva	26
4.3 Sommario	26
Capitolo 5 - Normativa CEI EN 60086-4 - Sicurezza delle pile al litio	27
5.1 Ciclo termico	27
5.2 Cortocircuito esterno	27
5.3 Scarica forzata	27
5.4 Sommario	28
Capitolo 6 - Normativa CEI EN 61427 - Elementi e batterie di accumulatori per sistemi fotovoltaici	29
6.1 Prestazioni delle batterie	29
6.2 Prova di durata in cicli in condizioni estreme	30

6.3	Sommario	31
Capitolo 7 - Normativa CEI EN 62509 - Prestazioni e funzionamento di regolatori di carica per impianti fotovoltaici		33
7.1	Protezione della batteria	33
7.2	Protezione in caso di errore	33
7.3	Sommario	34
Capitolo 8 - Normativa CEI EN 62109-1 - Convertitori di potenza		35
8.1	Protezione contro la scossa elettrica	35
8.1.1	Classificazione per tensione di funzionamento	36
8.1.2	Misure di protezione contro lo shock elettrico	36
8.1.3	Protezione contro i contatti diretti	37
	8.1.3.1 Involucri, barriere e isolamento	37
	8.1.3.2 Impedenza di protezione e tensione limitata	38
8.1.4	Protezione contro i contatti indiretti	39
	8.1.4.1 Protezione di classe I	39
	8.1.4.2 Protezione di classe II	40
	8.1.4.3 Caratteristiche dell'isolamento	41
8.2	Protezione contro i pericoli derivanti dall'energia	42
8.3	Protezione contro il pericolo di incendio	43
8.4	Condizioni di prova	44
	8.4.1 Condizioni delle porte di ingresso	44
	8.4.2 Condizioni delle porte di uscita	45
	8.4.3 Prove termiche	46
	8.4.4 Prove a guasto singolo	46
	8.4.5 Protezione contro il ritorno di tensione	47
8.5	Sommario	47
Capitolo 9 - Normativa CEI EN 62040-1 - Sistemi statici di continuità (UPS)		49
9.1	Prescrizioni fondamentali	49
9.2	Messa a terra e collegamento equipotenziale	50
9.3	Sezionamento circuiti a corrente continua e a corrente alternata	51
9.4	Protezione contro sovracorrenti e guasti a terra	52
9.5	Interblocchi di sicurezza	53
9.6	Cablaggi, connessioni e alimentazione	54
9.7	Sommario	54
Capitolo 10 - Normativa CEI EN 50272-2 - Prescrizioni di sicurezza per batterie di accumulatori e loro installazioni		57
10.1	Protezione contro i contatti diretti e indiretti	57
10.2	Protezione contro i cortocircuiti	59
10.3	Protezione contro i pericoli di esplosione	59
10.4	Sommario	60
Capitolo 11 - Conclusioni		61
Bibliografia e sitografia		63

Indice delle figure e dei grafici

Fig. 2.1 - Sistema ibrido connesso alla rete	3
Fig. 2.2 - Sistema FV ad isola di tipo DC	4
Fig. 2.3 - Sistema FV ad isola di tipo AC	4
Fig. 2.4 - Batteria al piombo-acido	6
Fig. 2.5 - Rapporto numero cicli/DoD per batterie al piombo	8
Fig. 2.6 - Batteria agli ioni di litio	9
Fig. 2.7 - Batteria sodio-cloruro di nickel	10
Fig. 2.8 - Regolatore di carica PWM per batterie al piombo	12
Fig. 2.9 - Regolatore di carica PWM per batterie al litio	13
Fig. 2.10 - Onda sinusoidale pura e onda sinusoidale modificata	15
Fig. 4.1 - Corrente di cortocircuito e resistenza interna per batterie al piombo	23
Fig. 4.2 - Operatività delle valvole per batterie VRLA	25
Fig. 8.1 - Forme d'onda per la determinazione della tensione di funzionamento	36
Fig. 8.2 - Diagramma delle misure di protezione contro lo shock elettrico	37
Fig. 8.3 - Dito di prova	38
Fig. 8.4 - Protezione mediante impedenza con limitazione di corrente	39
Fig. 8.5 - Protezione mediante impedenza con limitazione dell'energia di scarica	39
Fig. 8.6 - Protezione mediante limitazione della tensione	39
Fig. 8.7 - Simbolo doppio isolamento	41
Fig. 8.8 - Simbolo pericolo shock elettrico	42
Fig. 8.9 - Curva caratteristica I-V moduli fotovoltaici	45
Fig. 10.1 - Sistema TN-C	58
Fig. 10.2 - Sistema TN-S	58
Fig. 10.3 - Sistema TT	58
Fig. 10.4 - Sistema IT	59

Indice delle tabelle

Tab. 2.1 - Confronto caratteristiche batterie FLA, AGM e gel	7
Tab. 2.2 - Confronto caratteristiche catodi nelle batterie al litio	9
Tab. 2.3 - Caratteristiche batterie al sodio-cloruro di nickel	10
Tab. 4.1 - Prestazioni delle batterie VRLA a temperatura ambiente di 40°C	25
Tab. 6.1 - Rendimento minimo batterie al piombo rapportato al SoC	30
Tab. 6.2 - Fase A per prova di durata in cicli in condizioni estreme	31
Tab. 6.3 - Fase B per prova di durata in cicli in condizioni estreme	31
Tab. 8.1 - Classificazione dei convertitori attraverso tensione di funzionamento	36
Tab. 8.2 - Sezione conduttore di terra di protezione	40
Tab. 8.3 - Caratteristiche dell'isolamento in base alle condizioni di installazione	41
Tab. 8.4 - Sovratensione di tenuta dell'isolamento	42
Tab. 8.5 - Protezione da incendio per fonti di energia limitate	43
Tab. 8.6 - Protezione da incendio per fonti di energia non limitate	43
Tab. 9.1 - Dimensionamento morsetto di connessione per terra di protezione	51
Tab. 9.2 - Protezione contro guasti a terra e sovracorrenti per impianti monofase	53
Tab. 9.3 - Protezione contro guasti a terra e sovracorrenti per impianti trifase	53
Tab. 9.4 - Sezione conduttori di fase	54

1. INTRODUZIONE

Nell'ultimo decennio il costante incremento del fabbisogno energetico globale e dell'inquinamento atmosferico hanno spinto vari Stati ad adottare politiche economiche e di sviluppo atte ad incentivare la diffusione di impianti di energia da fonti rinnovabili.

Il rapido aumento del numero di installazioni di questi generatori ha causato un'elevata instabilità della rete elettrica.

Le principali cause sono imputabili all'aleatorietà della produzione energetica e all'inadeguatezza delle reti di distribuzione, quest'ultime strutturate per essere asservite da poche centrali elettriche e non da numerosi generatori distribuiti in modo capillare sul territorio ed interagenti con la rete stessa.

Tali sono le motivazioni che spingono l'interessamento dei vari enti preposti alla gestione delle reti ad attivare progetti pilota per l'accumulo dell'energia elettrica, allo scopo di assorbire i sovraccarichi della rete e di poter gestire in modo efficiente le centrali elettriche preesistenti alimentate da combustibili fossili.

Degna di nota è anche la prospettiva dell'evoluzione della rete in smart grid, la quale prevede il congiungimento e l'iterazione di piccoli impianti di produzione dislocati in vari nodi adiacenti, con il fine di migliorare l'efficienza e l'affidabilità dell'intero sistema e ridurre drasticamente le perdite di trasmissione.

Deve essere considerata inoltre la necessità di garantire l'approvvigionamento energetico a quelle utenze non raggiungibili dalla rete di distribuzione e l'esigenza di fornire la continuità del servizio elettrico a realtà particolari quali ospedali, linee di produzione e simili, congiuntamente alla volontà dei titolari di piccoli impianti di ottimizzare l'autoconsumo dell'energia prodotta al fine di ottenere vantaggi di tipo economico.

Tutte queste analisi preliminari portano ad una conclusione univoca, cioè la necessità di immagazzinare l'energia.

Scopo di questo elaborato è quello di studiare l'accumulo mediante processo elettrochimico, illustrando in un primo tempo le tecnologie più efficienti presenti sul mercato e di seguito studiando le normative CEI e/o IEC che ne determinano i parametri costruttivi e tecnologici fondamentali per la sicurezza dell'utente finale, con particolare attenzione al rischio elettrico.

2. IL SISTEMA DI ACCUMULO

Nella tecnica sono note svariate metodologie volte all'accumulo dell'energia elettrica, tra le più importanti si citano:

1. Pompe idrauliche.
2. Aria compressa.
3. Fuel cell ad idrogeno.
4. Accumulatori tradizionali.
5. Accumulatori redox.
6. Fluidi termovettori.
7. Supercapacitori.
8. Superconduttori magnetici.
9. Flywheel.

Non potendo entrare nello specifico di tutte le tecnologie succitate, nel prosieguo verranno analizzati esclusivamente i componenti costituenti i sistemi di accumulo mediante processo elettrochimico e le norme ad essi associate, lasciando l'approfondimento delle restanti tecniche alla curiosità del lettore.

Per ottenere un sistema di accumulo funzionante ed efficiente sono necessari, oltre alle batterie per l'immagazzinamento elettrochimico dell'energia, dei dispositivi elettronici che trasformino e adattino le tensioni e le correnti, con particolare riguardo alla sicurezza degli utenti ed al corretto utilizzo delle batterie nelle fasi di carica e scarica.

Il sistema viene definito ibrido quando si ha la contemporaneità di due o più fonti di corrente diverse: la prima è necessariamente di tipo rinnovabile, mentre per la seconda viene usualmente utilizzato un generatore diesel e/o la rete di distribuzione.

Di seguito, in Fig 2.1, vengono raffigurate delle possibili topologie della rete.

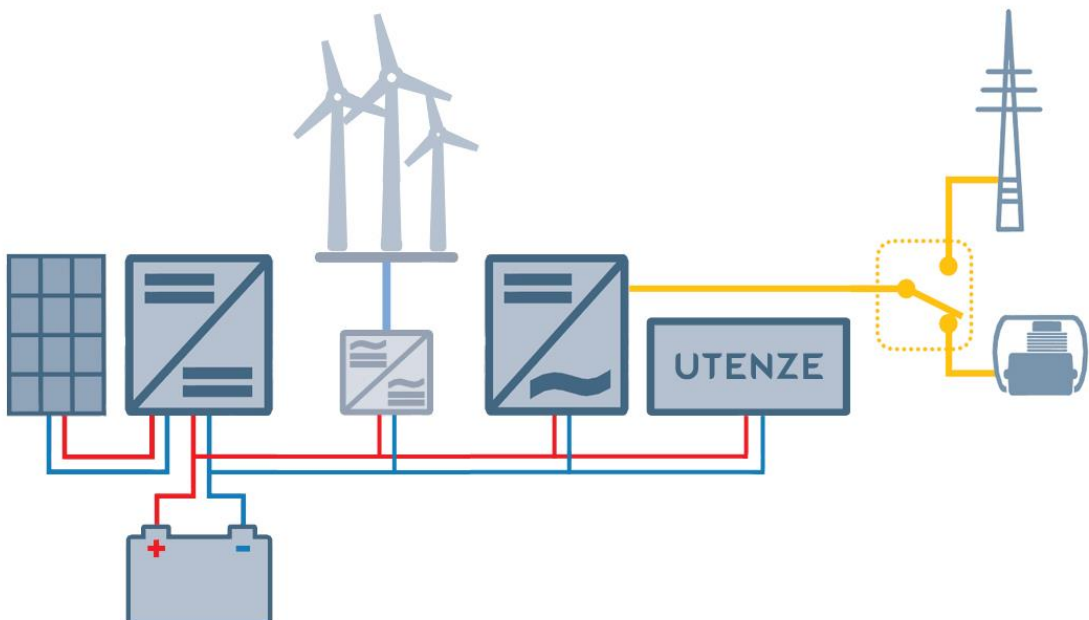


Fig. 2.1 - Sistema ibrido connesso alla rete¹

¹ Fonte: Steca Elektronik GmbH

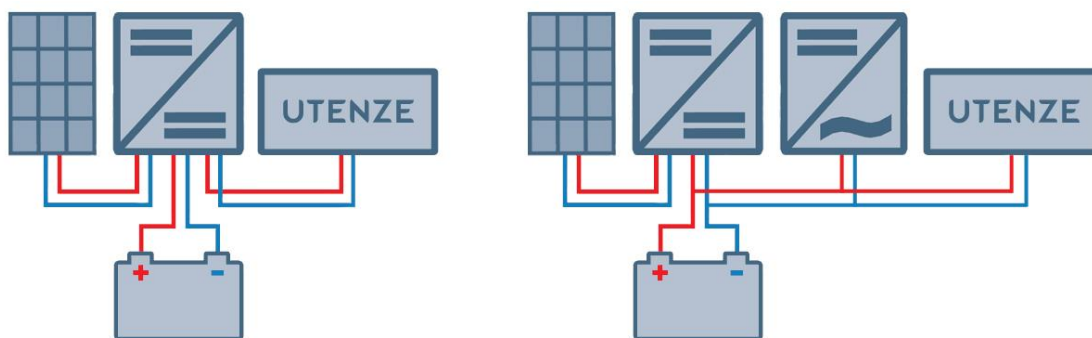


Fig. 2.2 - Sistema FV ad isola di tipo DC Fig. 2.3 - Sistema FV ad isola di tipo AC

Come evidenzia la Fig.2.1, all'uscita del generatore è presente un regolatore di carica, un convertitore DC/AC e un gruppo di batterie.

In aggiunta in alcune tipologie di accumulatori è altresì presente un dispositivo comunicante con le batterie e denominato BMS (Battery Management System).

Di seguito si analizzeranno le funzioni e le caratteristiche generali dei dispositivi costituenti il sistema di accumulo.

2.1 Batterie

Il blocco cardine del sistema di accumulo è rappresentato dalle batterie, essendo l'elemento più critico e soggetto ad inefficienze.

Soffermandosi brevemente sulle criticità, si evidenziano le seguenti:

1. Fattori costruttivi: presenza di acidi e/o elementi esplosivi.
2. Tipologia di utilizzo: i cicli di carica/scarica non sono prevedibili essendo dipendenti da fenomeni aleatori, come l'irraggiamento, il vento, ecc.
3. Stagionalità: per un impianto FV la produzione di energia in estate sarà nettamente maggiore che in inverno, per un impianto mini idroelettrico la quantità d'acqua sarà scarseggiante nella stagione estiva, ecc.
4. Fattori fisici: la batteria è fonte di pericolo per sé e per gli utenti in caso di temperature e correnti elevate, sovraccarica e permanenza in stato di scarica profonda.

Alla luce di tali aspetti, diventa fondamentale utilizzare regolatori di carica con funzioni atte a gestire le batterie e contemporaneamente risulta necessario conoscere la zona di installazione, la natura dei carichi, le condizioni di utilizzo, la tecnologia costruttiva e il funzionamento degli accumulatori.

Allo scopo di comprendere al meglio gli aspetti trattati dalle normative tecniche che riguardano lo storage dell'energia mediante accumulo in batterie, in questo capitolo saranno esposti brevemente i principi di funzionamento generali e saranno introdotte le tecnologie più idonee per l'accumulo.

Per definizione la batteria è un dispositivo composto da una o più celle elettrochimiche, connesse in serie o in parallelo, che convertono l'energia chimica immagazzinata al suo interno in energia elettrica.

La struttura è formata da un elettrodo negativo, denominato anodo, che trattiene gli ioni carichi, un elettrodo positivo, definito catodo, che trattiene gli ioni scarichi, un elettrolito che permette

agli ioni di muoversi tra l'anodo e il catodo durante la carica e la scarica, due terminali che consentono alla corrente di fluire verso la rete a cui è connessa la batteria.

A seconda della possibilità di ripetere o meno l'operazione di carica e scarica, si è soliti qualificare le batterie come primarie, o pile, nel caso di uso singolo oppure secondarie, o accumulatori, se sono possibili più cicli.

Quest'ultima categoria viene ulteriormente ripartita in base ai materiali usati per gli elettrodi e l'elettrolito, siccome si generano diverse reazioni chimiche e si determinando caratteristiche confrontabili tra loro.

Le principali specifiche tecnologiche e operative sono:

1. Tensione [V]: differenza di tensione misurabile ai capi degli elettrodi.
2. Capacità assegnata C_{rt} [Ah]: quantità di elettricità che una batteria può fornire ininterrottamente in determinate condizioni a seguito di una carica completa.
3. Capacità nominale C_{nom} [Ah]: valore approssimato di elettricità utilizzato per identificare la capacità di una batteria.
4. Densità volumetrica di energia [Wh/l]: misura quanta energia è immagazzinabile a parità di volume.
5. Densità gravimetrica di energia [Wh/kg]: misura quanta energia è immagazzinabile a parità di peso.
6. Corrente di picco [A]: massima corrente fornibile in un breve lasso temporale senza compromettere l'integrità della batteria.
7. Temperatura d'esercizio [°C]: temperatura alla quale la batteria opera correttamente in sicurezza.
8. Autoscarica [%]: quantità di energia persa autonomamente dalle celle in un determinato tempo.
9. Numero di cicli: numero di cariche/scariche che una batteria può fornire prima di giungere a fine vita (80% residuo della sua capacità iniziale).
10. Profondità di scarica (DoD) [%]: quantità di energia prelevata.
11. Stato di carica (SoC) [%]: quantità di energia disponibile.

Tra i parametri non quantificabili ma che sono allo stesso modo importanti, si ricordano tra tutti la sicurezza e l'affidabilità.

Entrando nello specifico, si possono analizzare le più importanti tipologie di batterie secondarie presenti sul mercato adatte per l'accumulo di energia da fonti rinnovabili:

1. Batteria piombo-acido.
2. Batteria al litio.
3. Batteria sodio-cloruro di nickel.

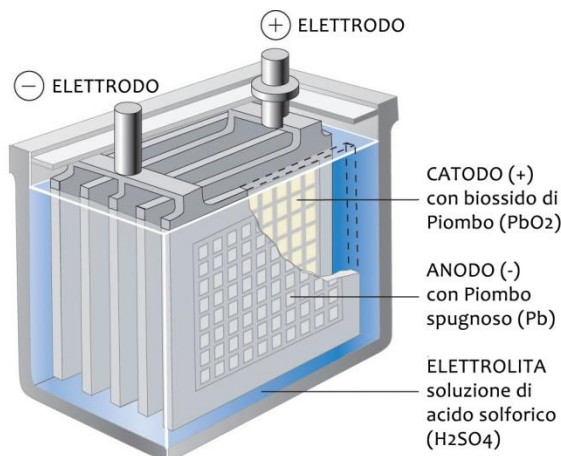
Nei seguenti paragrafi verranno esposti in maniera intuitiva la composizione ed il funzionamento chimico dei principali accumulatori, con particolare riguardo alle caratteristiche enunciate in precedenza ed ai principali vantaggi e svantaggi appartenenti a ogni differente tecnologia.

2.1.1 Batteria piombo-acido

La batteria al piombo-acido, come quasi tutti gli accumulatori, è formata da più celle interconnesse in serie.

Ognuna cella a sua volta è composta da un anodo al piombo (Pb) e un catodo al diossido di piombo (PbO₂) immersi in una soluzione elettrolitica acquosa contenente acido solforico (H₂SO₄).

In Fig. 2.4 è possibile osservare uno spaccato della tipologia di batteria appena descritta.



La reazione chimica che avviene nella cella è di ossidoriduzione.

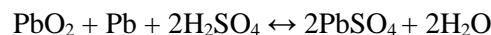
Una reazione è detta di riduzione quando viene sottratto ossigeno ad una sostanza per effetto degli elementi riducenti che si legano all'ossigeno.

Al contrario, se viene ceduto ossigeno, si parla di ossidazione e le sostanze che cedono ossigeno sono chiamate ossidanti.

Le reazioni redox, in cui sono presenti ioni, sono caratterizzate dal passaggio di elettroni dal riducente all'ossidante.

Fig.2.4 - Batteria piombo-acido

La reazione complessiva di ossidoriduzione è descritta dalla seguente formula:



Si evince che l'agente ossidante sottrae elettroni da un elettrodo e quello riducente li fornisce all'altro, generando nella cella un passaggio di corrente dovuto agli ioni e una differenza di tensione di circa 2V.

Le batterie al piombo-acido sono classificate in due categorie distinte per tecnica costruttiva:

1. Batteria a vaso aperto FLA (Flooded Lead-Acid).
2. Batteria regolata da valvola VRLA (Valve-Regulated Lead-Acid).

L'accumulatore FLA deve il nome alla presenza di un eccesso di fluido elettrolita, dove le piastre di anodo e catodo sono completamente immerse.

Durante la reazione di ossidoriduzione si verifica una perdita di idrogeno e ossigeno, per questo è necessaria una manutenzione periodica con relativo rabbocco di acqua distillata che al successivo ciclo di carica si scompone e va a rigenerare l'elettrolita.

La seconda è detta VRLA e deve il suo nome alla presenza di una o più valvole di sicurezza.

Le batterie VRLA possono essere classificate a loro volta in:

1. Batteria AGM (Absorbed Glass Mat).
2. Batteria gel.

L'accumulatore AGM ha l'elettrolito assorbito in un separatore in fibra di vetro, mentre quello al gel ha l'elettrolito miscelato con polvere di silice.

Le batterie VRLA al piombo acido, data la loro particolare tecnologia costruttiva, non necessitano di manutenzione in quanto l'ossigeno generatosi all'anodo si ricombina con l'idrogeno del catodo, permettendo la formazione di acqua.

In questo modo i gas non vengono rilasciati dalla batteria ma si ricombinano tra loro, creando un notevole vantaggio dato dalla possibilità di installazione anche in ambienti poco ampi e scarsamente ventilati.

La valvola di rilascio si attiva nella fase di ricarica quando si hanno almeno una delle seguenti condizioni:

1. Sovratensione nelle celle, limite di 2,30V a 25°C.
2. Sovracorrente o cortocircuito.
3. Ricarica rapida errata.

Nel caso in cui la valvola si attiva si ha una perdita di elementi che permettono l'ossidazione, con conseguente calo della capacità dell'accumulatore non più recuperabile.

In Tab. 2.1 vengono riepilogati i principali vantaggi e svantaggi delle batterie FLA, AGM e gel.

Tab. 2.1 - Confronto caratteristiche batterie FLA, AGM e gel

CARATTERISTICA	FLA	AGM	GEL
TENSIONE NOMINALE CELLA	2V	2V	2V
NUMERO DI CICLI / PROFONDITÀ SCARICA (A 20°C)	1.400 @ 60% DoD 4.000 @ 20% DoD	750 @ 60% DoD 2.800 @ 20% DoD	800 @ 60% DoD 2.700 @ 20% DoD
ENERGIA SPECIFICA	50 - 55 Wh/kg	35 - 45 Wh/kg	40 - 45 Wh/kg
RANGE TEMP. (T IDEALE +20°C)	-20°C / +45°C		
PERFORMANCE CARICA/SCARICA PARZIALE	Alta		Bassa
AUTOSCARICA	Ca. 3%/mese		
MANUTENZIONE	Periodica	Assente	
FLESSIBILITÀ INSTALLAZIONE	Bassa	Alta	
SICUREZZA	Bassa (pericolo esplosione)	Alta (valvola di sicurezza)	
COSTO	Basso	Medio	Alto

Di seguito, in Fig. 2.5, viene riportato un grafico che raffigura nel dettaglio il rapporto tra numero di cicli e profondità di scarica per le tre diverse tipologie di batterie al piombo acido.

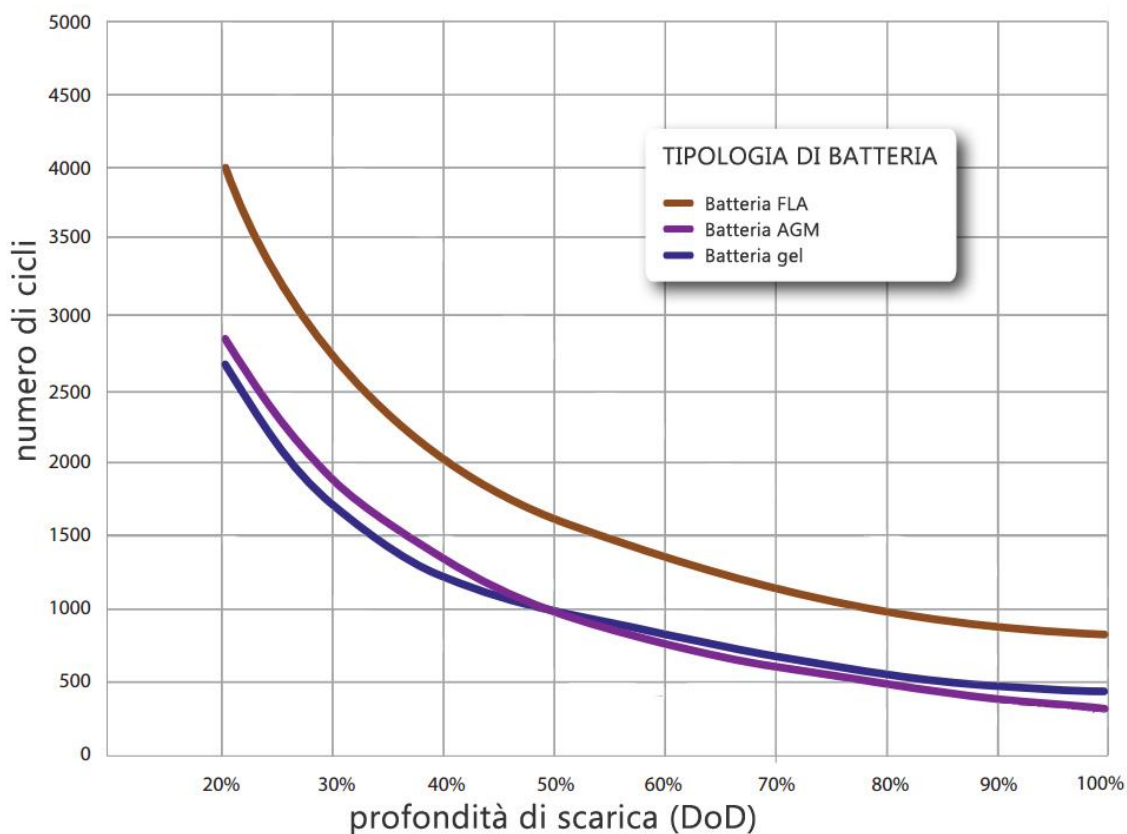


Fig. 2.5 – Rapporto numero cicli/DoD per batterie al piombo²

Osservando la Tab. 2.1 e la Fig. 2.5 si può dedurre che la batteria FLA è quella con condizioni di utilizzo più flessibili e con maggiori prestazioni.

Tuttavia bisogna considerare la necessità di manutenzione periodica e la difficoltà di installazione dovuta all'emissione di gas, quindi per zone difficilmente raggiungibili e per ambienti poco ampi è sconsigliato il loro utilizzo.

Per quel che riguarda le batterie VRLA, noti i vantaggi di installazione e l'assenza di manutenzione, si osserva che le batterie AGM sono le più indicate per i sistemi grid-tie con la funzionalità di UPS in virtù delle maggiori performance a carica/scarica parziale, mentre quelle al gel sono più prestanti nella configurazione off-grid dove i cicli sono più profondi.

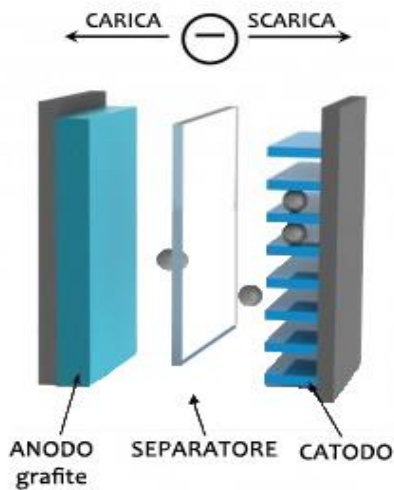
Ovviamente queste sono considerazioni di carattere generale, del tutto indipendenti dall'ambiente di installazione, dove bisogna valutare caso per caso le condizioni di esercizio.

² Fonte: Trojan Battery Company

2.1.2 Batteria al litio

La batteria al litio è disponibile in varie configurazioni date dalla diversa composizione dei tre principali elementi che costituiscono tutte le batterie: anodo, catodo ed elettrolita.

Tipicamente l'anodo è formato da grafite, il catodo da un ossido di metallo (es. LiCoO_2 , LiMn_2O_4 o LiFePO_4) e l'elettrolita da sale di litio in solvente organico.



Al variare della composizione del catodo e dell'elettrolita si avranno diverse specifiche quali tensioni, capacità, numero di cicli e livello di sicurezza.

A fianco, in Fig. 2.6, viene visualizzato come durante la fase di scarica gli ioni di litio passano per mezzo dell'elettrolita dall'anodo al catodo attraverso il separatore interposto tra i due, mentre durante la carica avviene il viceversa.

Il potenziale che si viene a creare nella cella raggiunge i 3,6 Volt nominali, mentre durante l'utilizzo varia da un minimo di 2,8 ad un massimo di 3,7 V/cella.

Fig. 2.6 - Batteria agli ioni di litio

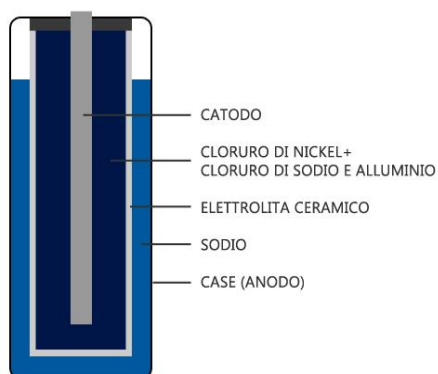
In Tab. 2.2 è possibile confrontare le batterie agli ioni di litio con i diversi catodi definiti in precedenza.

Tab. 2.2 – Confronto caratteristiche catodi nelle batterie al litio

CARATTERISTICA	$\text{LiCoO}_2 / \text{LiMn}_2\text{O}_4$	LiFePO_4
TENSIONE NOMINALE CELLA	3,7V	3,3V
NUMERO DI CICLI / PROFONDITÀ SCARICA (A 20°C)	750 @ 100% DoD 1.900 @ 80% DoD	2.000 @ 100% DoD 3.000 @ 80% DoD
ENERGIA SPECIFICA	256 Wh/kg	128 Wh/kg
POTENZA SPECIFICA	512 W/kg	1.000 W/kg
TEMPERATURA MASSIMA	55°C	40°C
MANUTENZIONE	Assente	
SICUREZZA	Bassa, richiedono circuito di protezione e bilanciamento celle	Molto sicura, richiede protezione in tensione e bilanciamento celle

Si può notare che la tecnologia preferibile per lo storage dell'energia è quella con catodo LiFePO_4 in quanto permette un elevato numero di cicli, un'elevata potenza specifica, una discreta densità di energia che si traduce in pesi ridotti a parità di capacità e una notevole sicurezza, spesso integrata nella batteria stessa attraverso il Battery Management System.

2.1.3 Batteria sodio-cloruro di nickel



Si osserva dalla Fig. 2.7 che la cella della batteria sodio-cloruro di nickel è composta da un anodo formato da sodio allo stato liquido separato dal catodo metallico da un elettrolita denominato β -aluminia, il quale permette di condurre velocemente gli ioni di sodio e assicura l'isolamento elettrico tra i due elettrodi. La reazione chimica è descritta dalla formula $\text{NiCl}_2 + 2\text{Na} \leftrightarrow 2\text{NaCl} + \text{Ni}$

Fig. 2.7 - Batteria sodio-cloruro di nickel

La temperatura operativa della cella si attesta tra i 250°C e i 350°C per permettere al sodio di persistere allo stato liquido e creare una tensione a circuito aperto di 2,58V.

Un grosso vantaggio di questa tecnologia risiede nella possibilità di ricaricare la cella anche in condizioni di scarica totale.

Questa tecnica di accumulo è alquanto nuova, tuttavia degli studi in campo automotive hanno riportato una capacità residua del 100% dopo 7 anni di test e 5.000 cicli operativi.

Tali esperimenti portano a presupporre una vita utile stimata superiore a 15 anni, dove l'unico limite è rappresentato dalla possibile corrosione delle parti metalliche della cella.

In Tab. 2.3 sono riassunte le principali caratteristiche di questa tipologia di accumulatore.

Tab. 2.3 – Caratteristiche batterie al sodio-cloruro di nickel

CARATTERISTICA	Sodio-cloruro di nickel
TENSIONE NOMINALE CELLA	2,58V
NUMERO DI CICLI / PROFONDITÀ SCARICA (A 20°C)	3.000 @ 80% DoD
ENERGIA SPECIFICA	140 Wh/kg
TEMPERATURA ESERCIZIO	270°C
MANUTENZIONE	Assente
SICUREZZA	Alta, spesso isolante termico, BMS integrato

2.2 Regolatore di carica

Nel sistema di accumulo è fondamentale la presenza di un dispositivo che si interponga tra il campo di produzione dell'energia e il pacco batterie.

Questo dispositivo, denominato regolatore di carica, ha molteplici funzioni fondamentali e indipendenti dalla tipologia di accumulatore:

1. Calcolo dello stato di carica delle batterie e inserimento/disinserimento carico.
2. Protezione da sovraccarica e scarica profonda.
3. Protezione contro l'inversione della polarità della batteria.
4. Protezione da sovracorrente, sovratensione e sovratemperatura.
5. Carica manutentiva a compensazione dell'autoscarica della batteria.

Per ottenere la massima efficienza e un adeguato livello di sicurezza durante il processo di carica sono disponibili svariate tecniche ricavate dallo studio delle proprietà delle diverse tipologie di batterie.

Nei prossimi paragrafi verranno illustrate le tre tipologie di regolatori più importanti e diffusi sul mercato.

2.2.1 Regolatore di carica PWM

In letteratura sono ben note due metodologie molto importanti per la carica delle batterie:

1. Metodo a corrente costante.
2. Metodo a tensione costante.

Nel metodo a corrente costante si ha che durante tutta la fase di carica la corrente inviata alla batteria rimane invariata mentre la tensione decrementa progressivamente.

Questa tecnica qualitativamente è la più rapida, tuttavia giungendo a fine carica vi è della corrente in eccesso che viene utilizzata per l'elettrolisi, provocando un aumento della temperatura interna e un degrado della capacità delle celle.

Analogamente il metodo a tensione costante fissa il voltaggio di carica e fornisce una corrente variabile superiore alla corrente nominale della batteria.

Giungendo verso fine carica la tensione dell'accumulatore si incrementa, di conseguenza viene diminuita la corrente inviata alla stessa, con il vantaggio di annullare i rischi di sovraccarico della batteria ed evitare perdite di energia.

Di contro, essendo molto elevata la corrente nelle prime fasi di carica, si ha un forte stress dei materiali costituenti l'accumulatore con conseguente rischio di fuoriuscita di sostanze nocive.

Inoltre, verso fine carica, la corrente inviata è talmente piccola che può causare fenomeni di sottocarica a lungo termine, con conseguente effetto negativo sulla vita utile della batteria.

La combinazione di queste due tecniche, in unione ad una terza denominata carica di mantenimento, permette di sfruttare appieno le potenzialità e di ovviare agli svantaggi indotti dalle singole metodologie.

Questa tipologia di regolatore di carica viene denominata PWM ed è ideale per gli accumulatori al piombo-acido.

Di seguito, in Fig. 2.8, un grafico illustra come avviene il ciclo di carica per una batteria FLA o VRLA.

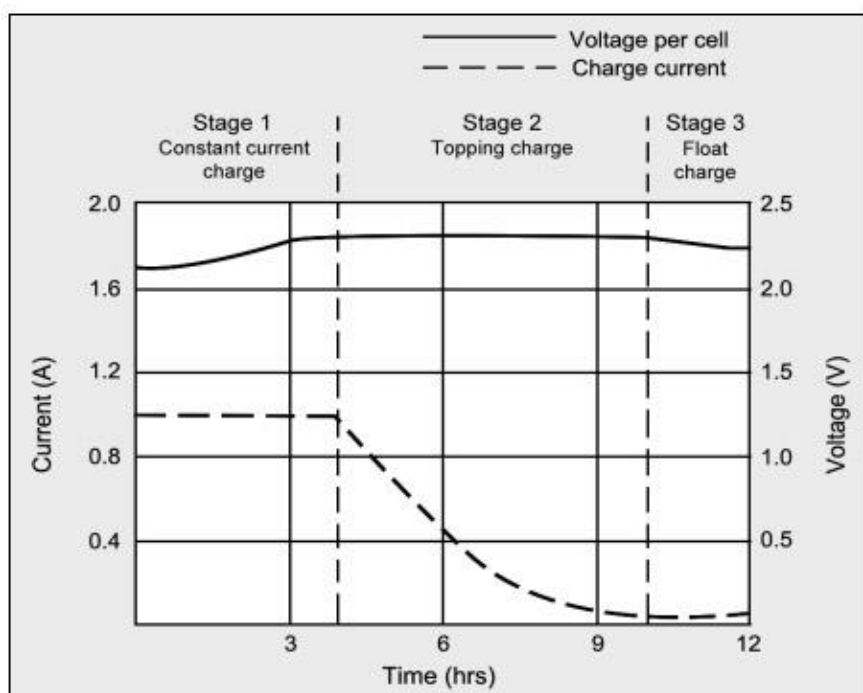


Fig. 2.8 - Regolatore di carica PWM per batterie al piombo³

Durante la prima fase di carica l'accumulatore riesce ad accettare una quantità di corrente superiore a quella nominale, perciò il regolatore fornisce una corrente costante elevata riducendo sensibilmente i tempi di ricarica.

La seconda fase prevede una tensione costante e una corrente che decresce proporzionalmente all'aumento della tensione della batteria, permettendo di completare la carica senza compromettere la capacità totale.

La terza fase è la carica di mantenimento, avviene ad una tensione leggermente inferiore alla precedente ed è utile per compensare le perdite di energia della batteria.

A livello manutentivo alcuni regolatori forniscono una carica di equalizzazione, con lo scopo di eliminare eventuali diversità di densità e tensione tra le singole celle.

2.2.2 Regolatore di carica per batterie al litio

Il regolatore di carica per le batterie al litio agisce similmente al regolatore PWM per le batterie al piombo, con la differenza che deve fornire un voltaggio superiore, deve avere maggiore sensibilità in tensione e non fornisce la carica di mantenimento.

La carica di questo tipo di batterie è più critica in quanto un sovraccarico può portare a situazioni altamente pericolose date dalla possibile esplosione dell'accumulatore stesso.

Come raffigurato in Fig. 2.9, il regolatore di carica agisce in tre fasi distinte.

³ Fonte: <http://www.batteryuniversity.com>

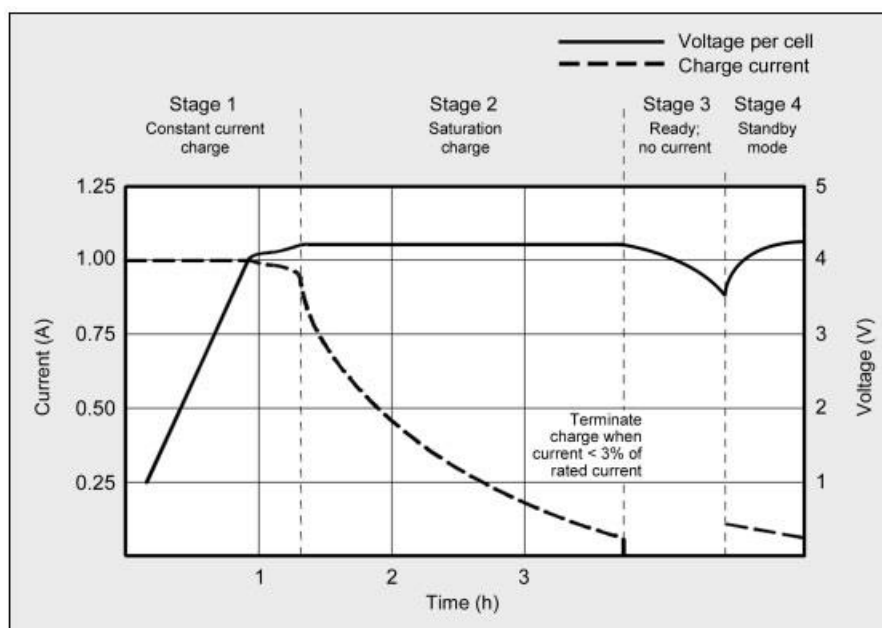


Fig. 2.9 - Regolatore di carica PWM per batterie al litio⁴

Inizialmente viene applicata una corrente costante che carica rapidamente la batteria fino al 70%-80% della sua capacità.

Nella seconda fase viene imposta una tensione costante allo scopo di portare in saturazione la batteria e completarne la ricarica. Questa fase è decisamente più lenta della prima.

Raggiunto il 97%-99% della capacità la carica viene interrotta disattivando il regolatore per non sovraccaricare la batteria.

A causa dell'autoscarica si ha una minima perdita di energia che viene compensata al raggiungimento di una soglia di tensione.

2.2.3 Regolatore di carica MPPT

Questo particolare regolatore di carica viene utilizzato esclusivamente negli impianti fotovoltaici in combinazione con batterie al piombo.

Possiede le stesse funzionalità del regolatore PWM, ma ha la peculiarità di riuscire a compensare la differenza di voltaggio tra i moduli fotovoltaici ed il pacco batterie, convertendo la tensione eccedente in un surplus di corrente immagazzinabile dall'accumulatore.

Risulta svantaggioso utilizzarlo quando la tensione dei moduli è molto prossima a quella delle batterie in quanto il suo rendimento si attesta intorno all'85%-90% a fronte di un'esigua fornitura di corrente aggiuntiva.

In questo caso è preferibile un regolatore PWM, che ha rendimenti prossimi al 99%.

⁴ Fonte: <http://www.batteryuniversity.com>

2.3 Battery Management System (BMS)

Il Battery Management System è un dispositivo elettronico usualmente installato sul pacco batterie per monitorare diversi parametri fondamentali per ottenere una carica efficiente e sicura.

Nelle batterie al piombo non è necessario questo dispositivo in quanto al regolatore di carica è sufficiente conoscere lo stato di carica SoC, ottenibile indirettamente misurando la tensione ai capi della batteria.

Gli accumulatori al litio e al sodio-cloruro di nickel risultano invece più sofisticati e per questo è necessario tenere sotto controllo temperatura, tensione, corrente, SoC e SoH della batteria.

La temperatura è un parametro fondamentale in quanto se troppo alta pone la batteria in uno stato di pericolo per la sicurezza.

Siccome una sovratemperatura si verifica prevalentemente nello stato di carica, usualmente si agisce diminuendo la corrente inviata alla batteria, ottenendo la cosiddetta compensazione della temperatura.

La tensione delle celle è altresì importante. Se è troppo alta porta all'instabilità della batteria a causa dell'aumento della pressione interna della cella con conseguente rischio di esplosione, mentre se è troppo bassa la batteria non risulta più ricaricabile con gli usuali regolatori di carica.

La corrente viene monitorata perché un flusso superiore a quello nominale per un tempo prolungato può danneggiare irrimediabilmente la batteria.

I parametri SoC e SoH sono ricavabili direttamente da tensione e temperatura e sono fondamentali per una corretta carica/scarica dell'accumulatore.

Il BMS comunica queste informazioni al regolatore di carica riuscendo in questo modo ad ottenere il massimo delle performance e della sicurezza dalla batteria.

2.4 Convertitore DC/AC

Il convertitore AC/DC, o equivalentemente inverter, è un dispositivo che converte la corrente continua in corrente alternata alla tensione di rete, equivalente a 230V_{eff} per i sistemi monofase e 400V_{eff} per i sistemi trifase.

Le tipologie di inverter usualmente utilizzati sono due e sono distinguibili per la forma d'onda fornita in uscita:

1. Onda sinusoidale pura (Pure Sine Wave).
2. Onda sinusoidale modificata (Modified Sine Wave).

Osservando la Fig. 2.10 si possono notare immediatamente alcuni vantaggi portati dal PSW rispetto al MSW:

1. Elevata efficienza della potenza effettiva erogata.
2. Distorsione di armoniche inferiori al 3%.
3. Compatibilità con tutti i tipi di apparecchi.
4. Consumi ridotti a parità di rendimento.
5. Minore surriscaldamento data dall'assenza di picchi di commutazione.

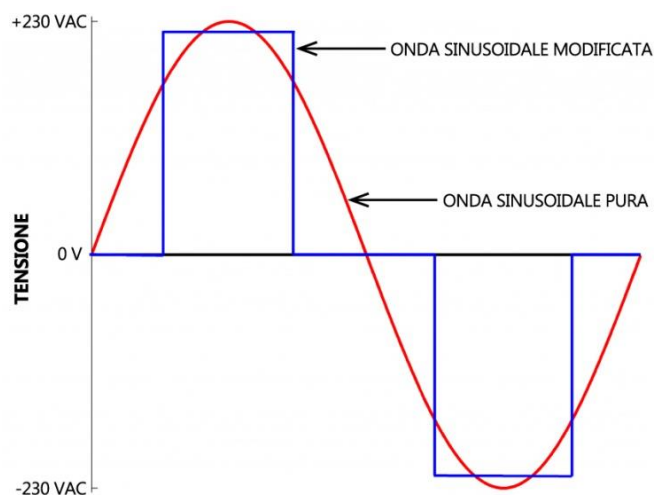


Fig. 2.10 - Onda sinusoidale pura e onda sinusoidale modificata

Soffermandosi sul punto 3 del precedente elenco, si specifica che gli inverter MSW sono compatibili con svariate apparecchiature, mentre possono indurre danneggiamenti in altre più sofisticate come dispositivi Hi-Fi e motori elettrici.

Gli inverter PSW sono compatibili con tutte le apparecchiature e spesso volte producono un'onda sinusoidale migliore di quella di rete, con notevoli vantaggi nella vita utile delle utenze stesse.

Quindi nonostante i sistemi PSW siano più costosi a causa della maggiore complessità del circuito di conversione, sono preferibili agli inverter MSW.

3. PRINCIPI DI SICUREZZA ELETTRICA

Con lo scopo di definire la buona tecnica per i prodotti e gli impianti elettrici, costituendo il concetto di presunzione di conformità alla regola d'arte, ci sono associazioni nazionali e internazionali che elaborano, pubblicano e diffondono le normative tecniche del settore elettrotecnico, elettronico e delle telecomunicazioni.

Nel 1909 a tal fine fu fondato il CEI (Comitato Elettrotecnico Italiano), successivamente riconosciuto dalla legge n. 186 del 1 marzo 1968 come riferimento per la realizzazione di apparecchiature e impianti a regola d'arte.

Il CEI per la stesura delle nuove norme o per l'aggiornamento delle stesse recepisce le direttive imposte dalla Comunità Europea e adotta documenti elaborati da altri organi indipendenti, come il CENELEC che opera nell'area europea o l'IEC che svolge la propria attività a livello internazionale.

Questa stratificazione dei comitati è fondamentale per adattare i concetti di buona tecnica alle varie realtà che si presentano nelle diverse macroaree geografiche.

Per una migliore comprensione degli argomenti trattati successivamente, nel seguito di questo capitolo, verranno brevemente introdotti i concetti fondamentali di sicurezza elettrica.

La norma CEI EN 60950, denominata "Apparecchiature per la tecnologia dell'informazione – Sicurezza", viene in aiuto introducendo formalmente i principi generali di sicurezza per le apparecchiature alimentate da rete o da batteria con tensione nominale non superiore a 600V.

Si specifica che questa norma è di carattere generale, infatti esistono altre normative denominate di prodotto che si applicano a merci specifiche che richiedono un maggior approfondimento tecnico.

Come precisato nello scopo normativo, sono trattate le apparecchiature costituite da un sistema di unità interconnesse o da unità indipendenti e vengono specificate le prescrizioni previste per ridurre i rischi di incendio, di scossa elettrica o di lesione per l'operatore e i non addetti che possono venire a contatto.

Tornando ai principi di sicurezza, il progettista deve tener conto di:

1. Normali condizioni di funzionamento dell'apparecchiatura.
2. Condizioni di guasto e dei guasti conseguenti.
3. Prevedibili usi impropri da parte degli utenti.
4. Influenze esterne quali temperatura, altitudine, umidità e sovratensioni sulla rete di alimentazione.

Obiettivo di questo elaborato è analizzare i sistemi di accumulo, perciò si riportano i seguenti pericoli da prevenire applicabili al caso trattato:

1. Scossa elettrica.
2. Pericoli relativi all'energia.
3. Incendio.
4. Pericoli chimici.

3.1 Scossa elettrica

Citando la norma, “la scossa elettrica è dovuta al passaggio della corrente attraverso il corpo umano.

Gli effetti fisiologici risultanti dipendono dal valore e dalla durata della corrente e dal percorso che essa compie attraverso il corpo.

Il valore della corrente dipende dalla tensione applicata, dall'impedenza della sorgente e dall'impedenza del corpo.

L'impedenza del corpo dipende dalla superficie di contatto, dall'umidità delle superficie di contatto e dalla tensione e dalla frequenza applicate.”

A livello pratico si ha che correnti superiori a 0,5A transitori per il corpo umano portano all'arresto cardiaco o alla fibrillazione ventricolare, con conseguente probabilità di decesso.

$$I = \frac{V}{Z} < 0.5A$$

Tuttavia tensioni permanenti fino a 42,4V di picco o 60V in corrente continua di solito non sono considerate pericolose in condizioni di asciutto.

È questo il caso dei sistemi di accumulo dove tipicamente la tensione di esercizio ottenibile dalla serie di più batterie varia dai 12V ai 48V.

Fanno eccezione i sistemi integrati per la distribuzione dell'energia dove si raggiungono tensioni ben maggiori.

Altro discorso vale per i dispositivi che alimentano ed estraggono energia dagli accumulatori, considerato che in esercizio normale operano a tensioni decisamente superiori e quindi non sicure. L'esempio più semplice si applica agli inverter DC/AC che in uscita lavorano alla tensione di rete di 230VAC o 400VAC.

3.2 Pericoli relativi all'energia

Il pericolo relativo all'energia è derivante ad un probabile cortocircuito tra i poli adiacenti che può causare ustioni, archi e/o emissione di materiale fuso.

Sono quindi considerati pericolosi anche quei circuiti e dispositivi precedentemente enunciati che operano a tensione sicura.

Nel sistema considerato questo rischio riguarda in particolar modo le batterie in quanto al loro interno è accumulata un'elevata quantità di energia elettrochimica.

3.3 Incendio

Come descritto dalla norma, i pericoli possono risultare da temperature eccessive in condizioni di funzionamento normale o causate da sovraccarichi, guasti di componenti, cedimento dell'isolamento o allentamento di connessioni.

Questo rischio è intrinseco, anche se in misura diversa, in ogni dispositivo elettronico e quindi coinvolge anche i componenti utilizzati nel sistema di accumulo.

3.4 Pericoli chimici

I pericoli chimici possono risultare dal contatto con alcune sostanze chimiche o dall'inalazione dei loro vapori e dei loro fumi.

Nel sistema di accumulo questo pericolo è caratteristico degli accumulatori essendo composti da soluzioni chimiche poco stabili, come le batterie al litio, e/o a causa della fuoriuscita di gas, come le batterie al piombo FLA e, in misura minore, le batterie al piombo VRLA.

3.5 Sommario

Come è possibile intuire i pericoli legati alle apparecchiature elettroniche sono molteplici, per questo motivo è necessario attenersi fedelmente alle prescrizioni introdotte dalle norme generiche e di prodotto.

Ciò nonostante, è data facoltà di non attenersi fedelmente ad alcune raccomandazioni o metodi di prova riportati dalle normative, a patto di apportare modifiche a vantaggio di sicurezza e di comprovare l'effettivo miglioramento del prodotto.

In qualsiasi caso resta sempre prioritario agire per ridurre al minimo il rischio, sia di natura elettrica che meccanica, così come acustica e termica.

4. NORMATIVA CEI EN 60896 - BATTERIE DI ACCUMULATORI STAZIONARI AL PIOMBO

Le batterie stazionarie al piombo possono essere considerate conformi se rispettano le prescrizioni riportate nella norma CEI EN 60869-11 “Batterie di tipo aperto” per gli accumulatori FLA e nelle norme CEI EN 60869-21 e CEI EN 60869-22 “Tipi regolati con valvole” per gli accumulatori VRLA.

Lo scopo di tali norme è quello di prescrivere le caratteristiche principali e le prove che devono rispettare gli accumulatori al piombo impiegati in installazioni fisse e collegati in modo permanente ad un carico e ad una fonte di alimentazione in corrente continua.

Di seguito, in questo e negli altri capitoli relativi alle norme di prodotto, verranno esposte brevemente le principali prove da effettuare per comprovare la conformità dei singoli componenti del sistema di accumulo.

Lo scopo di questo tipo di trattazione è quello di rendere note al lettore le principali problematiche legate ai singoli prodotti e parallelamente comprendere le motivazioni che spingono ad adottare determinate soluzioni per ottenere un sistema che operi in maniera sicura e efficiente.

4.1 Normativa CEI EN 60896-11 - Batterie del tipo aperto

La norma CEI EN 60896-11 introduce i test da effettuare sulle batterie FLA per determinarne le caratteristiche fondamentali, tra quelle trattate si riportano le prove di capacità, durata, corrente di cortocircuito e resistenza interna.

4.1.1 Capacità

La caratteristica fondamentale di un accumulatore è la capacità di immagazzinare energia mediante processo elettrochimico.

L'unità di misura della capacità è l'amperora [Ah], come precedentemente definito nel paragrafo 2.1, e varia con le condizioni di utilizzo quali temperatura di esercizio e corrente e tensione di scarica.

Per individuare la capacità della batteria in determinate condizioni, l'unità di test deve essere sottoposta ad una corrente di scarica per un tempo predefinito.

I valori di tempo più comunemente utilizzati sono 10h, 8h, 5h e 3h e la tensione di fine scarica per ogni singolo elemento deve essere $U_f = 1,80$ V.

La quantità di corrente di scarica utilizzata alla temperatura di riferimento di 20°C o 25°C è $I_{rt} = \frac{C_{rt}}{t}$, dove C_{rt} è la capacità assegnata dichiarata dal costruttore.

Definiti i valori di tempo e corrente di scarica, la batteria completamente carica viene scaricata alla corrente costante I_{rt} .

La tensione ai capi della batteria deve essere registrata automaticamente in funzione del tempo e la corrente di scarica deve essere interrotta quando $U = n \cdot U_f$, dove n è il numero degli elementi costituenti la batteria.

Essendo possibile testare più accumulatori interconnessi tra di loro, la prova può ugualmente essere considerata terminata quando anche solo una delle batterie ha raggiunto un valore di tensione $U = U_f - (\sqrt{n} \cdot 0,2V)$.

La capacità misurata C viene calcolata come $C = I_{rt} \cdot t_{eff}$, con t_{eff} pari al tempo di prova, mentre il test si ritiene superato se la capacità misurata $C \geq 0,95 \cdot C_{rt}$ al primo ciclo e $C=C_{rt}$ al quinto ciclo.

4.1.2 Durata

La durata viene definita come l'attitudine di una batteria ad operare e sopportare utilizzazioni in condizioni definite per un periodo minimo di tempo.

Si suddivide in due prove distinte che hanno la finalità di determinare le prestazioni della batteria:

1. Prova di durata in condizioni normali.
2. Prova di durata in sovraccarica.

La prescrizione minima di prova per la durata in cicli di scarica/carica è di due periodi di 50 cicli ciascuno, al termine dei quali la capacità misurata non deve essere inferiore a $0,95 \cdot C_{10}$, dove C_{10} è la capacità assegnata in 10 ore.

Ogni singolo ciclo comprende una scarica di 3 ore ad una corrente $I = 2 \cdot I_{10}$ e una carica della durata di 21 ore ad una tensione di 2,40V/elemento e $I_{max} = 2 \cdot I_{10}$.

Dopo ogni serie di 50 cicli si deve sottoporre la batteria alla prova di capacità riportata al paragrafo 4.1.1.

Al termine della prova di capacità si esegue un'altra serie di 50 cicli con relativa ulteriore misurazione della capacità per stabilirne la conformità.

È possibile continuare ad iterare questo procedimento per definire le prestazioni della batteria fino a quando la capacità residua non risulta inferiore a $C = 0,8 \cdot C_{10}$.

La prova di durata in sovraccarica prevede almeno sei periodi di 720 ore ciascuno ed è considerata superata se la capacità al termine del test è superiore a $0,8 \cdot C_1$, dove C_1 è la capacità assegnata in 1 ora mediante scarica fino ad $U_f = 1,60V$.

La batteria sottoposta al test viene sovraccaricata con una corrente costante $I = 0,2 \cdot I_{10}$, fino a giungere ad $U = 1,80V$.

Dopo 720 ore il livello dell'elettrolito deve essere rabboccato fino al livello massimo e successivamente viene misurata la capacità della batteria con tempo t pari ad 1 ora, tasso di scarica fino a $U_f = 1,60V$, temperatura tra 25°C e 30°C.

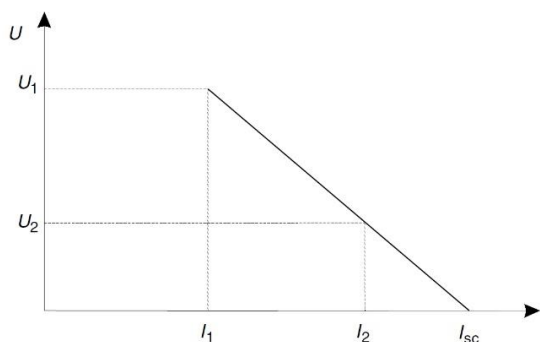
Tale procedimento deve essere ripetuto per un totale di sei volte per ottenere la conformità, mentre è possibile continuare il test per determinare le prestazioni fino a quanto la capacità residua misurata permane superiore a $C = 0,8 \cdot C_{rt}$.

Per entrambe le prove di durata è ammesso il rabbocco di elettrolito durante le fasi di test.

4.1.3 Corrente di cortocircuito e resistenza interna

La determinazione della corrente di cortocircuito e della resistenza interna è fondamentale per consentire ai progettisti di dimensionare correttamente le protezioni esterne connesse alla batteria.

Per stabilire tali valori bisogna determinare la caratteristica di scarica dell'accumulatore e tracciarne il grafico come riportato in Fig. 4.1.



Il primo punto (U_1, I_1) si ricava mediante misurazione di tensione e corrente dopo una scarica di 20 secondi con $I_1 = 4 \cdot I_{10}$. Dopo un intervallo di tempo di 5 minuti a circuito aperto si può procedere alla determinazione del secondo punto (U_2, I_2), applicando per 5 secondi una corrente di scarica $I_2 = 20 \cdot I_{10}$.

Fig. 4.1 - Corrente di cortocircuito e resistenza interna per batterie al piombo⁵

La corrente di cortocircuito è calcolata con la formula $I_{sc} = \frac{[(U_1 \cdot I_2) - (U_2 \cdot I_1)]}{U_1 - U_2}$, mentre la resistenza interna è pari a $R_i = \frac{U_1 - U_2}{I_2 - I_1}$.

4.2 Normative CEI EN 60896-21 e CEI EN 60896-22 - Tipi regolate con valvole

Le normative CEI EN 60896-21 e CEI EN 60896-22 si riferiscono agli accumulatori al piombo regolati da valvole e prescrivono, come per la precedente norma, i metodi di prova e i requisiti minimi che devono osservare per essere ritenute conformi.

Il numero di prove per questa tipologia di batteria è più elevato rispetto alle FLA in quanto, essendo sigillate e regolate da valvole, richiedono maggiori attenzioni ai fini della sicurezza.

Inoltre le norme riguardanti le batterie VRLA, essendo più recenti rispetto alla CEI EN 60896-11, integrano altri aspetti di sicurezza che precedentemente non erano stati considerati.

Tra le prove richieste dalla norma, oltre ai test già enunciati per le batterie FLA, verranno esaminate nello specifico quelle che riguardano:

1. Emissione di gas.
2. Tolleranza a correnti elevate.
3. Operatività delle valvole.
4. Vita operativa a 40°C.
5. Scarica eccessiva.

La norma prescrive anche altri test da effettuare sulle batterie, tuttavia non verranno esaminati in quanto non ritenuti strettamente attinenti alla sicurezza elettrica e alla determinazione delle prestazioni.

4.2.1 Emissione di gas

Questo test ha lo scopo di determinare il volume di gas emesso dalla batteria in condizioni prossime ed eccedenti la tensione di carica completa per poter dimensionare correttamente lo scambio d'aria del locale batterie.

Le misurazioni di gas emesso dalle batterie si compone di due parti:

1. Gas emesso in condizioni di carica di mantenimento.
2. Gas emesso in condizioni di elevato voltaggio.

⁵ Fonte: CEI EN 60896-11, Fig. 1, pag. 15

Le batterie sottoposte a questo test devono essere inizialmente caricate con capacità C3 e in seguito sottoposte ad una carica di mantenimento per 72 ore.

Al termine di questo procedimento inizia la raccolta del gas espulso dalla batteria per un periodo di 168 ore.

Tale processo deve essere ripetuto per un totale di quattro cicli.

Il volume totale di gas accumulato nei quattro periodi deve essere registrato in abbinamento alla temperatura ambiente T_a e alla pressione ambiente P_a .

Il valore ottenuto dalle misurazioni deve essere riportato alle condizioni di riferimento $T_r = 20^\circ\text{C}$ e $P_r = 101,3 \text{ kPa}$ mediante la formula $V_n = \frac{V_a \cdot T_r}{T_a} \cdot \frac{P_a}{P_r}$.

Il volume di gas emesso G_e da ogni singola cella per ogni ora in condizioni di carica di mantenimento è calcolato con la formula $G_e = \frac{V_n}{n \cdot 168 \cdot C_{rt}}$.

Per eseguire il secondo test la tensione di carica viene incrementata a 2,40 V/elemento e dopo 24 ore di carica di mantenimento ricomincia la raccolta del gas emesso per un periodo di 48 ore o fino al raggiungimento del volume di 1000 ml.

In questa prova il procedimento da effettuare non richiede ripetizioni.

Anche in questo caso si procede alla normalizzazione alle condizioni di riferimento e deve essere calcolato il volume di gas emesso G_e da ogni singola cella per ogni ora in condizioni di elevato voltaggio, con $G_e = \frac{V_n}{n \cdot 48 \cdot C_{rt}}$.

I valori di entrambi i volumi G_e devono essere riportati dal costruttore.

4.2.2 Tolleranza a correnti elevate

Lo scopo di questo test è quello di verificare che i componenti interni alla batteria siano abbastanza robusti per sopportare correnti elevate per brevi periodi prima dell'intervento di dispositivi di protezione esterna.

Per questa prova la batteria deve essere completamente caricata con capacità C3 e, in seguito, si sottopone l'unità ad una scarica di 30 secondi con la corrente massima sopportabile dal dispositivo.

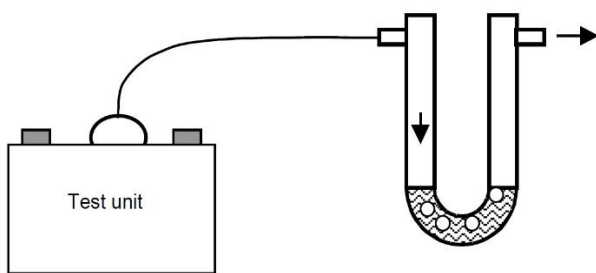
Al termine del procedimento si lascia la batteria per 5 minuti in condizioni di circuito aperto e successivamente la sua tensione deve essere misurata.

Il test si ritiene superato se la tensione dell'unità è superiore a 2V/elemento e non vi è evidenza di cedimento dei materiali a causa delle correnti.

4.2.3 Operatività delle valvole

Questa verifica deve essere eseguita ad una temperatura compresa tra 55°C e 60°C , con l'unità sovraccaricata ad una tensione compresa tra 2,60V e 2,70V per almeno un'ora.

L'unità di test deve essere predisposta come raffigurato in Fig. 4.2.



Tutto il gas rilasciato dalla batteria deve essere raccolto e inviato ad un tubo ad U parzialmente riempito d'acqua.

L'emissione di gas dalle valvole deve essere verificato visivamente mediante la formazione di bolle nel liquido inserito nel tubo ad U.

Fig. 4.2 - Operatività delle valvole per batterie VRLA⁶

Tale test è fondamentale per verificare il corretto funzionamento delle valvole onde evitare l'aumento della pressione interna e il rischio di esplosione.

4.2.4 Vita operativa a 40°C

Questa prova è utile per determinare le prestazioni della batteria e per fornire agli utenti delle informazioni realistiche riguardanti l'operatività a temperature eccedenti quella di riferimento.

La batteria, caricata completamente ad una capacità di $0,95 \cdot C_{rt}$, viene posta sotto carica di mantenimento in un locale con temperatura ambiente di 40°C e umidità del 35% per un periodo di 118 giorni.

In seguito deve essere eseguito il test della capacità e ripetuto l'iter fino a quando la capacità misurata non risulta inferiore a $0,8 \cdot C_{rt}$.

Le capacità individuate devono essere registrate e riportate dal produttore su un grafico.

La norma assegna dei valori per la determinazione delle performance dell'unità, come riportato in Tab.4.1.

Tab. 4.1 – Prestazioni delle batterie VRLA a temperatura ambiente di 40°C⁷

TEMPO ESPOSIZIONE	GIORNI DI TEST
Breve	≥ 500 giorni
Medio	≥ 750 giorni
Lungo	≥ 1100 giorni
Molto lungo	≥ 1700 giorni

Queste informazioni sono utili per permettere al progettista o all'utente finale di scegliere in modo semplice un prodotto di qualità operante anche in condizioni sfavorevoli.

⁶ Fonte: CEI EN 60896-21, Fig. 6, pag. 51

⁷ Fonte: CEI EN 60896-22, Tab. 19, pag. 41

4.2.5 Scarica eccessiva

La prova ha l'utilità di verificare la capacità della batteria di poter essere ricaricata a seguito di una scarica eccessiva.

L'unità di test deve essere completamente carica e in seguito, a temperatura di riferimento, scaricata con una corrente I_{10} fino a quando non raggiunge la tensione $U_f = n \cdot 1,25V$.

Dopo aver effettuato il ciclo di scarica, la batteria deve essere ricaricata per 168 ore con una corrente $I = 2,0 \cdot I_{10}$ e voltaggio limitato a quello di carica di mantenimento.

Tale sequenza deve essere ripetuta 5 volte e poi l'unità deve essere sottoposta al test di capacità.

La verifica si ritiene superata se la batteria non ha subito un decremento della propria capacità superiore al 90%.

4.3 Sommario

Nella prima parte di questo capitolo sono stati introdotti concetti rilevanti riguardanti le batterie, come la capacità e la corrente di carica e scarica, oltre ad aver esaminato la corretta metodologia utilizzata per stabilire le caratteristiche principali degli accumulatori al piombo.

Conseguentemente si è visto che per ottenere una batteria a norma sotto il profilo della sicurezza e delle prestazioni è fondamentale che non subisca un degrado delle proprietà e dei componenti a seguito di cicli di test sia in condizioni di uso normale che in contesti sfavorevoli.

È emerso inoltre l'obbligo del costruttore a fornire indicazioni che permettano ai progettisti di dimensionare correttamente le protezioni esterne e il locale batterie, in accordo con le norme che saranno esposte nei capitoli seguenti.

5. NORMATIVA CEI EN 60086-4 – SICUREZZA DELLE PILE AL LITIO

Gli accumulatori al litio, rispetto alle batterie al piombo, presentano un elevato rischio dato dall'elettrolito acquoso che contiene materiali infiammabili.

Per questo motivo deve essere posta molta attenzione nella loro integrazione nei sistemi di accumulo e al contempo deve essere approfondita la conoscenza del loro funzionamento sotto diverse condizioni operative.

Similmente a quanto avvenuto per le batterie al piombo, la norma CEI EN 60086-4 “Sicurezza delle pile al litio” determina le prescrizioni e le prove che gli accumulatori al litio devono rispettare per essere considerati sicuri in condizioni di uso normale e scorretto ragionevolmente prevedibile.

Purtroppo la natura di questa norma è piuttosto generica data la scarsa diffusione delle batterie al litio nelle applicazioni stazionarie, rimanendo in ogni caso un buon riferimento per poter analizzare la sicurezza di questa tipologia di accumulatore.

5.1 Ciclo termico

Le prove per l'uso normale per questo tipo di batteria sono quattro, tuttavia ne verrà esaminata solamente una in quanto ritenuta strettamente attinente ai pericoli riportati al Cap. 4.

La verifica in questione prevede l'esposizione della batteria ad un ciclo termico per verificare la tenuta dell'involucro e delle connessioni elettriche in condizioni climatiche altamente variabili.

Il test infatti consiste dapprima all'immagazzinamento per almeno 12 ore ad una temperatura di 75°C, seguito in rapida successione ad ulteriori 12 ore a -40°C.

Viene considerato superato se non vi è alcuna perdita di massa, fuoriuscita di materiale, cortocircuito e rottura o esplosione della batteria.

5.2 Cortocircuito esterno

La prova deve essere eseguita per verificare il comportamento dell'unità a seguito di un utilizzo improprio provocato da un cortocircuito esterno.

L'accumulatore deve quindi essere testato ad una temperatura ambiente di 55°C e posto in una condizione di cortocircuito con una resistenza esterna tra i poli inferiore a 0,1Ω.

Questa condizione deve essere mantenuta per almeno un'ora e, una volta eliminato il cortocircuito, la batteria deve essere tenuta monitorata per altre 6 ore.

Il test è superato se non si evidenzia alcun aumento di temperatura eccessivo, rottura, esplosione o fuoco durante tutta la prova e il seguente periodo di osservazione.

5.3 Scarica forzata

Questa prova ha lo scopo di esaminare la capacità della batteria a sopportare una condizione di scarica forzata, situazione potenzialmente pericolosa che si viene a creare a causa di un uso scorretto dell'accumulatore.

Il test deve essere eseguito con batterie completamente scariche, collegate in serie ad un alimentatore in corrente continua a 12V con corrente iniziale uguale alla corrente di scarica massima sopportata dall'accumulatore.

La corrente di scarica si ottiene collegando un carico resistivo appropriato in serie tra la batteria e l'alimentatore e deve essere mantenuta per un tempo $t = \frac{C}{I}$, dove C è la capacità e I è la corrente di prova iniziale.

A seguito del test l'unità deve essere tenuta sotto osservazione per 7 giorni, al termine dei quali non deve essersi verificata alcuna esplosione per considerare la prova superata.

5.4 Sommario

Il principale problema evidenziato dalla norma è il rischio di esplosione dato dalla variazione di volume e pressione dell'elettrolita all'interno del contenitore sigillato della batteria.

I test riportati precedentemente ne attestano la sicurezza in condizioni anomale, tuttavia è caldamente consigliato prestare la massima attenzione nel loro impiego al fine di evitare che si verifichino situazioni a rischio per l'incolumità delle persone e dell'ambiente.

6. NORMATIVA CEI EN 61427 – ELEMENTI E BATTERIE DI ACCUMULATORI PER SISTEMI FOTOVOLTAICI

A completamento di precedenti capitoli, di seguito verrà analizzata la normativa CEI EN 61427 “Elementi e batterie di accumulatori per sistemi fotovoltaici”, la quale si occupa delle problematiche legate all’aleatorietà delle fonti rinnovabili, in particolar modo dei sistemi fotovoltaici.

La norma introduce le prescrizioni aggiuntive da applicare agli accumulatori connessi a sistemi fotovoltaici per poter dichiarare la conformità di questi prodotti, oltre ai metodi di prova atti a verificarne le prestazioni.

Questo documento, a differenza di quelli trattati nei Cap. 4 e 5, è maggiormente rivolto ai progettisti per fornire raccomandazioni utili al corretto dimensionamento del sistema di accumulo, in particolar modo al pacco batterie.

6.1 Prestazioni delle batterie

Le batterie considerate nella trattazione sono quelle al piombo-acido FLA e VRLA e quelle al nichel-cadmio, quest’ultime non discusse nel presente elaborato.

L’accumulatore connesso ad un sistema fotovoltaico, in condizioni climatiche medie, deve essere in grado di fornire energia per un periodo compreso tra i 3 e i 15 giorni, tenendo conto del ciclo giornaliero/settimanale prescritto successivamente, dell’invecchiamento e dell’influenza della temperatura.

La corrente di carica tipica riportata dalla norma per il buon utilizzo della batteria è $I_{50} = \frac{C_{50}}{50h}$, mentre è considerata come corrente massima di carica $I_{20} = \frac{C_{20}}{20h}$.

Il ciclo giornaliero tipico prevede la carica nelle ore diurne e la scarica nelle ore notturne, assumendo mediamente una utilizzo della batteria compreso tra il 2% e il 20% della capacità.

Il ciclo stagionale considera l’influenza sullo stato di carica dell’accumulatore dato dalla differente radiazione solare disponibile nelle diverse stagioni, passando da un SoC $\leq 20\%$ nel periodo invernale ad un SoC $\geq 80\%$ nel periodo estivo.

Per i periodi con elevato irraggiamento la norma raccomanda il corretto dimensionamento del sistema di regolazione per non sovraccaricare la batteria, imponendo il limite di tensione massima a 2,4V.

Questa accortezza è fondamentale per evitare la produzione e l’emissione di gas, causa di:

1. Maggiore rischio di esplosione per batterie FLA, vedi Cap. 10.
2. Maggiore frequenza di manutenzione per rabbocco dell’acqua per batterie FLA.
3. Riduzione del numero di cicli per batterie VRLA.

Tale limite di 2,4V può essere eventualmente eccedibile per brevi periodi per consentire la carica di livellamento o la carica rapida.

Nei periodi con irraggiamento ridotto la batteria può trovarsi spesso a lavorare in condizioni di carica parziale e non raggiungere mai la carica totale.

La batteria al piombo non soffre dell’effetto memoria come le batterie al nichel, tuttavia deve essere protetta contro le scariche profonde che causano la perdita della capacità mediante solfatazione irreversibile.

In tal caso deve essere utilizzato un sistema che imponga un limite di tensione minima, non precisato nelle norme, e che intervenga scollegando automaticamente la batteria prima che raggiunga la massima profondità di scarica.

Tutte queste considerazioni devono sempre tener conto della variazione delle caratteristiche elettriche della batteria in relazione alle temperature di esercizio, dati che solitamente sono forniti dal produttore delle batterie.

La norma si limita ad indicare un range minimo di temperature operative compreso tra -15°C e $+40^{\circ}\text{C}$ con umidità inferiore al 90%, sottolineando come il superamento di tali valori è consentito ma comporta una riduzione significativa della capacità usufruibile e della vita utile dell'accumulatore.

Sostanziale per la determinazione delle prestazioni della batteria è il calcolo del rendimento delle celle o del loro insieme.

Il rendimento è definito come il rapporto tra la quantità di elettricità erogata durante la scarica e quella necessaria per ripristinare lo stato di carica.

La norma suggerisce dei valori di rendimento, riportati in Tab. 6.1, in caso di assenza di dati del costruttore calcolati alla temperatura di riferimento e con DoD inferiore al 20%.

Tab. 6.1 - Rendimento minimo batterie al piombo rapportato al SoC⁸

STATO DI CARICA (SoC)	RENDIMENTO
90%	> 85%
75%	> 90%
< 50%	> 95%

Si nota come il rendimento cresca al diminuire del SoC di partenza.

Questo dato è dovuto al fatto che durante la carica di ripristino della capacità iniziale la quantità di elettricità da fornire alla batteria è più elevata per SoC elevati, così come si può intuire osservando la Fig. 2.6, dove si nota un plateau della tensione ai capi delle celle verso fine carica.

6.2 Prova di durata in cicli in condizioni estreme

In tutte le applicazioni correlate alla generazione di energia elettrica da fonti rinnovabili aleatorie, in particolar modo per quella fotovoltaica, la batteria è soggetta ad un elevato numero di cicli poco profondi a diversi stati di carica.

Per garantire la qualità e il corretto funzionamento degli accumulatori, la norma prescrive una prova di durata in cicli per simulare le condizioni estreme in cui può operare tale apparecchiatura.

Gli elementi o le batterie monoblocco devono essere sottoposti a 50 cicli poco profondi a uno stato basso di carica e 100 cicli poco profondi a uno stato elevato di carica.

La prima serie di 50 cicli, denominata fase A, prevede l'esecuzione di tutti e tre i punti riportati nella Tab. 6.2 per la prima sequenza ed esclusivamente dei punti 2 e 3 per i restanti 49 cicli.

⁸ Fonte: CEI EN 61427, Tab. 4, pag. 12

Tab. 6.2 - Fase A per prova di durata in cicli in condizioni estreme⁹

	TEMPO DI SCARICA [H]	TEMPO DI CARICA [H]	CORRENTE [A]
1	9		I ₁₀ (o arresto a 1,75 V/elemento)
2		3	1,03 · I ₁₀
3	3		I ₁₀

Appena conclusa la fase A bisogna procedere con la fase B, che va ripetuta 100 volte in entrambi i suoi punti riportati nella Tab. 6.3.

Tab. 6.3 - Fase B per prova di durata in cicli in condizioni estreme¹⁰

	TEMPO DI SCARICA [H]	TEMPO DI CARICA [H]	CORRENTE [A]
1	2		1,25 · I ₁₀
2		6	I ₁₀ (o limite a 2,40 V/elemento)

Al termine della fase B la batteria è raffreddata e stabilizzata a 20°C o 25°C per 16 ore, al termine delle quali è possibile determinare la capacità C₁₀ in accordo con le norme riportate al Cap.4.

Durante i cicli è possibile rabboccare gli elementi o i monoblocchi di tipo FLA, a patto di misurare e registrare la quantità d'acqua aggiunta.

La prova viene considerata non superata se durante la fase A la tensione è inferiore a 1,5 V/elemento o se dopo la fase B la capacità verificata è inferiore all'80% di quella assegnata.

6.3 Sommario

Le prescrizioni contenute nella norma evidenziano la difficoltà nel fornire all'utente finale un prodotto con caratteristiche adeguate per soddisfare le esigenze energetiche in relazione alla variabilità giornaliera e stagionale.

Tale problematica può essere risolta grazie all'utilizzo di prodotti considerati idonei ad operare con questi particolari cicli e attraverso l'impiego di regolatori di carica efficienti che consentano di limitare la carica e la scarica per evitare danneggiamenti alla batteria.

Quest'ultimo aspetto legato al controllo della carica verrà trattato nel Cap. 7.

⁹ Fonte: CEI EN 61427, Tab. 6, pag. 18

¹⁰ Fonte: CEI EN 61427, Tab. 7, pag. 18

7. NORMATIVA CEI EN 62509 – PRESTAZIONI E FUNZIONAMENTO DI REGOLATORI DI CARICA PER IMPIANTI FOTOVOLTAICI

La norma CEI EN 62509 “Prestazioni e funzionamento di regolatori di carica per impianti fotovoltaici” introduce le prescrizioni da applicare ai regolatori destinati a batterie al piombo, tuttavia nello scopo normativo del documento è specificata la possibilità di estendere l’ambito applicativo anche ad altre tecnologie di accumulatori.

Al suo interno vengono sviluppate varie tematiche importanti, tuttavia saranno esaminate esclusivamente quelle che riguardano le funzioni di protezione in caso di errore e la salvaguardia delle batterie.

7.1 Protezione della batteria

Al fine di tutelare la batteria, il regolatore di carica deve limitare le correnti di dispersione verso il generatore ad un massimo del 0,1% della corrente di carica nominale.

Tale dispositivo deve predisporre valori di riferimento, adeguati alla tecnologia utilizzata, per ottimizzare la carica come in Fig. 2.6 e Fig. 2.7 e per proteggerla da sovraccarica e sovrascarica.

Il regolatore nel caso della sovrascarica deve essere in grado di interrompere il carico per non compromettere l’integrità della batteria o emettere un segnale di allarme sonoro o luminoso che avvisi del potenziale pericolo.

Questa protezione viene fornita mediante la misurazione della tensione ai capi dei morsetti dell’accumulatore e, per via indiretta, attraverso la determinazione dello stato di carica.

La regolazione della carica deve comprendere obbligatoriamente la carica di compensazione, mentre è solamente raccomandata la carica di equalizzazione con cadenza non superiore ai 7 giorni.

Deve essere prevista inoltre una compensazione della temperatura durante la fase di carica in quanto questo parametro fisico influenza pesantemente le prestazioni e la sicurezza della batteria, come visto più volte nei precedenti capitoli.

7.2 Protezione in caso di errore

Il convertitore deve essere in grado di continuare ad operare normalmente anche se sottoposto a sovracorrenti provenienti dalla fonte di alimentazione per valori fino al 125% superiori alla corrente massima di carica.

Se è consentita la connessione a dei carichi deve essere prevista una protezione ai terminali di uscita per prevenire danni causati dalla corrente.

Il dispositivo deve essere protetto anche contro l’inversione della polarità della batteria mediante accorgimenti hardware e, in caso di circuito aperto dovuto alla disconnessione della batteria, il regolatore di carica non deve riportare segni di danneggiamento.

Inoltre deve essere segnalato mediante allarme ciascuna delle seguenti situazioni:

1. Basso voltaggio, stato di carica e/o capacità.
2. Disconnessione del carico.
3. Disconnessione del regolatore (ad esempio per sovratemperatura).

7.3 Sommario

Il regolatore di carica ha l'importante compito di monitorare costantemente la tensione ai capi della batteria per la determinazione di fine carica e scarica, oltre al passaggio da un metodo di carica all'altro attraverso il superamento di valori soglia preimpostati.

Deve essere in grado di operare correttamente in condizioni di guasto e, nel caso fosse necessario, provvedere alla disconnessione della batteria per salvaguardarne l'integrità.

Risulta immediato quanto sia importante che vengano fornite al suo interno funzioni di controllo efficienti, affidabili e continuative per garantire il funzionamento ottimale dell'intero sistema.

8. NORMATIVA CEI EN 62109-1 – CONVERTITORI DI POTENZA

Il documento che esamina i convertitori DC/AC, o equivalentemente inverter, del sistema di accumulo è la CEI EN 62109-1 “Sicurezza dei convertitori di potenza utilizzati negli impianti fotovoltaici – Prescrizioni generali”.

La norma prevede, oltre agli argomenti riportati nel Cap. 4, aspetti riguardanti la sicurezza meccanica e acustica che non verranno trattati in quanto non attinenti alle finalità del presente elaborato.

Come specificato nello scopo della norma, vengono esaminati gli inverter per la conversione di energia fotovoltaica con tensione massima in ingresso di 1.500 Vdc e con tensione in uscita non eccedente i 1.000 Vac, connessi alla rete elettrica di distribuzione o a sistemi ad isola.

Viene indicata la possibilità di connessione a carichi in corrente continua, come le batterie, mentre una nota è dovuta in riferimento alla connessione di fonti di alimentazioni diverse da quella fotovoltaica e dalla rete di distribuzione.

La norma specifica che nella sua trattazione non vengono considerate ammissibili altre fonti, tuttavia essendo inesistente un documento specifico per le altre tipologie di generazione di energia rinnovabile, alcuni produttori di inverter utilizzano come riferimento questo standard.

In alternativa altri costruttori dichiarano conforme il loro prodotto, con destinazione d’uso a fonti rinnovabili aleatorie diversa da quella fotovoltaica, a normative più generiche, come la CEI EN 60204-1 “Sicurezza del macchinario - Equipaggiamento elettrico delle macchine”.

La succitata norma risulta alquanto simile al documento trattato in questo capitolo, quindi verrà esaminata esclusivamente la CEI EN 62109-1.

Da queste premesse ne segue che la direttiva è applicabile ai convertitori presenti nel sistema di accumulo, connessi a diverse fonti di energia in ingresso, collegati ad un pacco batterie e a loro volta interagenti con carichi sia isolati che connessi alla rete di distribuzione.

Citando la norma, l’obiettivo è di garantire che i metodi di progettazione e di costruzione forniscano una protezione sufficiente all’operatore e all’ambiente circostante, mentre sono esclusi dalla trattazione i seguenti aspetti:

1. Affidabilità funzionale, prestazioni o altre proprietà non riguardanti la sicurezza.
2. Compatibilità elettromagnetica.
3. Specifiche di installazione.

Il punto 3 del precedente elenco verrà trattato successivamente nel Cap. 10 facendo riferimento alla norma CEI EN 50272-2.

8.1 Protezione contro la scossa elettrica

In questo paragrafo verranno illustrati i requisiti minimi richiesti per ottenere un sufficiente grado di protezione del convertitore in condizioni di utilizzo normale o di singolo guasto.

La protezione contro il rischio elettrico si suddivide in due categorie:

1. Contatto diretto: contatto con parti attive che sono normalmente in tensione.
2. Contatto indiretto: contatto con una parte del circuito normalmente non in tensione ma che ha assunto una tensione pericolosa a causa di un guasto di isolamento.

8.1.1 Classificazione per tensione di funzionamento

È necessario definire la differenza tra le diverse tensioni a cui opera il dispositivo, classificandolo con la sigla DVC-X, dove la X può assumere le lettere A, B o C.

Nella seguente Tab. 8.1 vengono riportati i valori di tensione limite che permettono la classificazione dei convertitori.

Tab. 8.1 - Classificazione dei convertitori attraverso tensione di funzionamento¹¹

CLASSIFICAZIONE DI TENSIONE	LIMITE DI TENSIONE DI FUNZIONAMENTO		
	TENSIONE AC EFFICACE U_{ACL}	TENSIONE AC DI PICCO U_{ACPL}	TENSIONE DC MEDIA U_{DCL}
A	≤ 25 (16)	$\leq 35,4$ (22,6)	≤ 60 (35)
B	50 (33)	71 (46,7)	120 (70)
C	>50 (>33)	>71 ($>46,7$)	>120 (>70)

I valori riportati tra parentesi sono di riferimento per i dispositivi installati in luoghi con elevata umidità.

Le tensioni di funzionamento devono essere determinate nella condizione di caso peggiore e per mezzo dell'applicazione di una delle tre possibili forme d'onda definite dalla norma e riportate in Fig. 8.1.

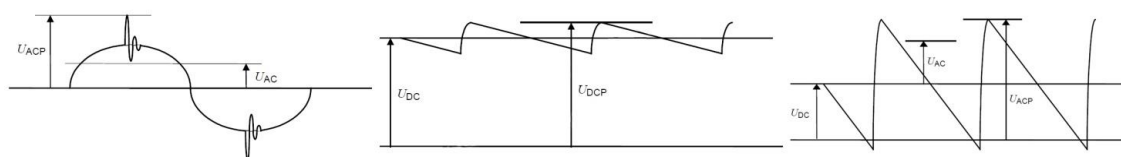


Fig. 8.1 - Forme d'onda per la determinazione della tensione di funzionamento¹²

I dispositivi classificati DVC-A sono ritenuti protetti contro qualsiasi tipologia di contatto senza l'ausilio di dispositivi di protezione esterni in quanto operano a tensioni non pericolose, mentre quelli di tipo DVC-B e DVC-C devono prevedere delle misure protettive specifiche, come riportato nel paragrafo 8.1.2.

8.1.2 Misure di protezione contro lo shock elettrico

La norma traccia le linee guida che il progettista deve seguire per realizzare un dispositivo che opera in modo sicuro contro qualsiasi tipo di contatto elettrico.

Per fare ciò riassume in un diagramma, riportato in Fig. 8.2, le soluzioni da adottare rapportate alla progettazione circuitale del convertitore.

Nei seguenti paragrafi di questo documento verranno esplicitati i requisiti minimi che deve rispettare ogni singola misura protettiva introdotta dal progettista ai fini di eliminare o quantomeno ridurre il rischio elettrico ed ottenere la conformità del prodotto.

¹¹ Fonte: CEI EN 62109-1, Tab. 6, pag. 49

¹² Fonte: CEI EN 62109-1, Tab. 2-3-4, pag. 51-52

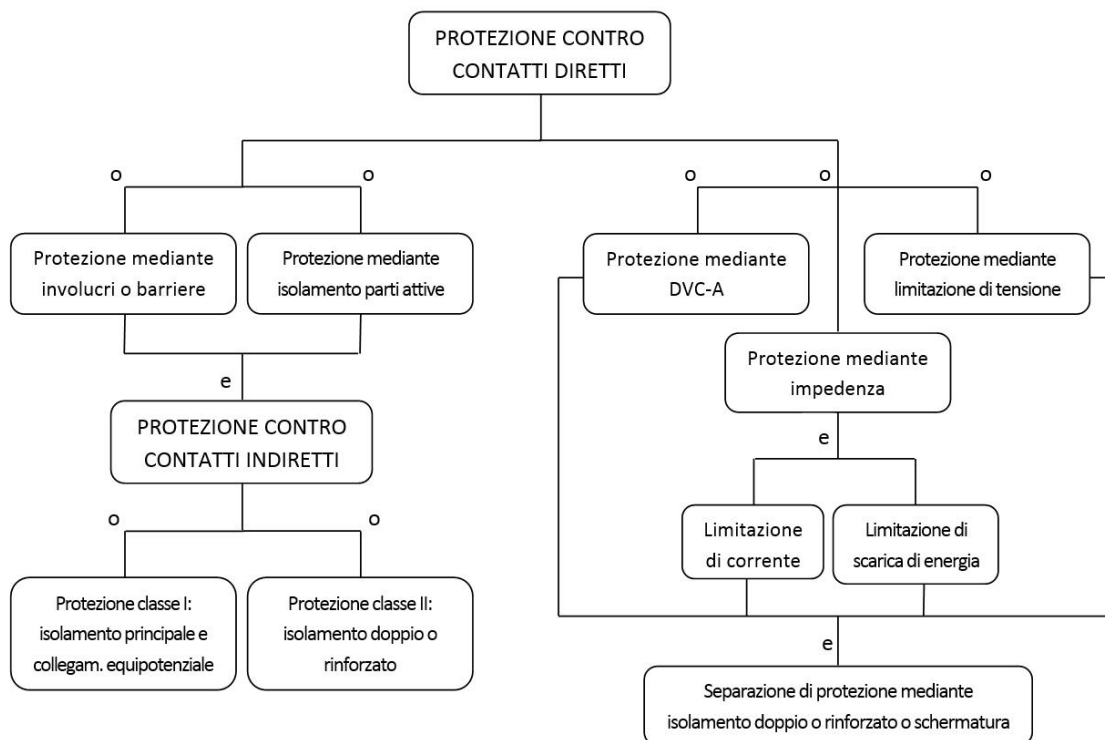


Fig. 8.2 – Diagramma delle misure di protezione contro lo shock elettrico¹³

8.1.3 Protezione contro i contatti diretti

Osservando la Fig. 8.2 si nota che a prescindere dalle decisioni progettuali adottate si devono prevedere delle protezioni contro i contatti diretti, sia che siano di isolamento che di protezione mediante limitazione della tensione e corrente circolante nel dispositivo.

8.1.3.1 Involucri, barriere e isolamento

Analizzando dapprima il ramo sinistro del diagramma riportato in Fig. 8.2, si osserva che per ottenere un'adeguata protezione contro i contatti diretti è fondamentale l'impiego di un involucro o barriera o di un isolamento.

Queste tipologie di protezioni non possono essere rimosse se non mediante un utensile, in caso contrario è nulla la loro efficacia.

Eventuali aperture non sono ritenute pericolose, anche se in contatto con parti in tensione, se il dispositivo è di tipo DVC-A, mentre è necessaria una distanza di isolamento per dispositivi DVC-B e DVC-C.

Il test di isolamento per questi ultimi due tipi di convertitori viene eseguito per mezzo di un dito di prova snodato, riportato in Fig. 8.3, che non deve entrare in contatto con nessuna parte attiva.

¹³ Fonte: CEI EN 62109-1, Fig. 1, pag. 48

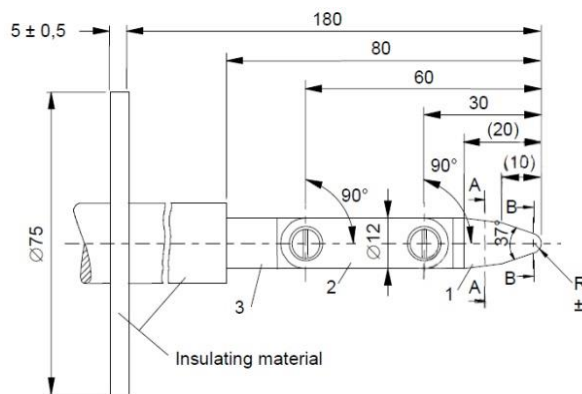


Fig. 8.3 - Dito di prova¹⁴

La protezione da contatto diretto con isolamento delle parti attive deve essere dimensionata alla massima tensione operativa per ciascuna categoria DVC e deve garantire la continuità anche in caso di sovratensioni temporanee e impulsi.

8.1.3.2 Impedenza di protezione e tensione limitata

Esaminando il ramo destro del diagramma riportato in Fig. 8.2, si nota che tutte le misure atte ad evitare il rischio elettrico sono relative ai contatti diretti.

Le protezioni definite nel paragrafo 8.1.3.1 non sono necessarie se il circuito accessibile soddisfa almeno uno dei seguenti requisiti:

1. Dispositivo di categoria DVC-A.
2. Presenza di un'apposita impedenza di protezione.
3. Limitazione di tensione.

Se il convertitore è di categoria DVC-A l'unica accortezza da tenere in considerazione è che, in caso di guasto o inversione di polarità ai morsetti di connessione, non ci deve essere una tensione nel circuito superiore a quella definita per questa tipologia di dispositivi.

Se il convertitore è di categoria DVC-B o DVC-C, la presenza di una impedenza di protezione rende sicuro il circuito limitando la corrente circolante o limitando l'energia di scarica.

Nel primo caso la norma prescrive che la corrente massima circolante tra le parti accessibili e l'impedenza non deve eccedere i 3.5mA AC o 10mA DC in condizioni normali o di singolo guasto.

Nel secondo caso l'energia di scarica disponibile tra le parti accessibili al momento del contatto non deve eccedere determinati valori di tensione rapportati alla capacità totale disponibile¹⁵, per esempio per una tensione di 100V la capacità massima ammissibile è di 0.58µF.

Nelle seguenti Fig. 8.4 e Fig. 8.5 vengono riportati degli esempi circuitali dei due casi descritti precedentemente.

¹⁴ Fonte: CEI EN 62109-1, Annex D, Fig. D-1, pag. 136

¹⁵ La tabella dei valori è riportata nella norma CEI EN 62109-1, Tab. 9, pag. 59

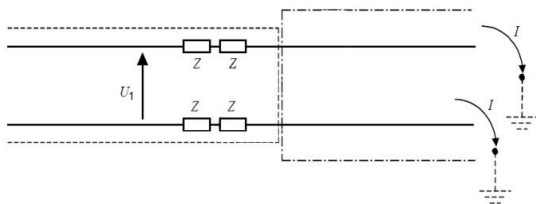


Fig. 8.4 - Protezione mediante impedenza con limitazione della corrente¹⁶

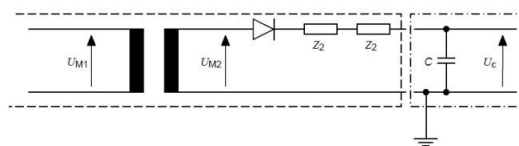


Fig. 8.5 - Protezione mediante impedenza con limitazione dell'energia di scarica¹⁷

L'altra tipologia di protezione consiste in una riduzione di tensione del circuito accessibile in categoria DVC-A partendo da un convertitore di categoria DVC-B o DVC-C, con l'accortezza di predisporre un'adeguata separazione tra i due circuiti, come in Fig. 8.6.

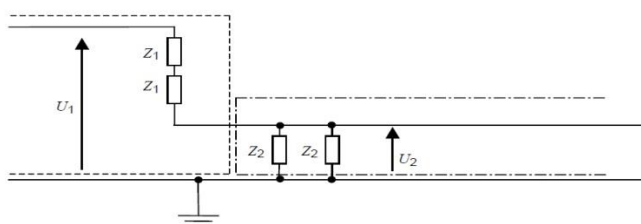


Fig. 8.6 - Protezione mediante limitazione della tensione¹⁸

Non risulta possibile applicare questa protezione ai dispositivi con protezione di classe II, in quanto è necessario il collegamento a terra.

Concludendo la norma prescrive che in caso di disconnessione la tensione residua deve essere ridotta a categoria DVC-A o, se ci sono dei condensatori carichi raggiungibili a seguito della rimozione dei coperchi o involucri, il voltaggio ai capi dei condensatori deve essere ridotto in base alla loro capacità, così come menzionato precedentemente, in un tempo inferiore ad 1 secondo.

8.1.4 Protezione contro i contatti indiretti

Continuando ad analizzare il ramo sinistro del diagramma riportato in Fig. 8.2, il convertitore deve essere reso immune anche ai contatti indiretti mediante una delle seguenti protezioni:

1. Protezione di classe I: isolamento base congiuntamente a messa a terra.
2. Protezione di classe II: isolamento doppio o rinforzato.
3. Protezione di classe III: tensione di funzionamento nominale limitata.

8.1.4.1 Protezione di classe I

Per ottenere la protezione di classe I è fondamentale realizzare una messa a terra a regola d'arte, per mezzo di un conduttore dedicato, tra i componenti metallici costituenti il convertitore che non possono essere rimossi durante il funzionamento normale.

Per la messa a terra non sono ammessi condotti metallici flessibili o rigidi da costruzione, a meno che non sia comprovata la loro capacità di protezione.

Il conduttore di terra deve resistere agli stress termici e dinamici, deve essere codificato con il colore giallo-verde e può essere dimensionato correttamente in due modi:

¹⁶ Fonte: CEI EN 62109-1, Fig. 7, pag. 58

¹⁷ Fonte: CEI EN 62109-1, Fig. 8, pag. 59

¹⁸ Fonte: CEI EN 62109-1, Fig. 9, pag. 60

1. Prove di sovracorrente per un determinato tempo indicato dalla norma, al termine del quale non si devono verificare danni che possono compromettere la funzionalità del conduttore.
2. Tabella di riferimento tra la sezione dei conduttori di fase¹⁹ e il conduttore di terra in accordo con la norma IEC 60364-5-54.

Di seguito per semplicità viene riportata esclusivamente la Tab. 8.2 richiamata al punto 2, valida solo se il conduttore di terra è costruito con lo stesso metallo dei conduttori di fase.

Tab. 8.2 - Sezione conduttore di terra di protezione²⁰

SEZIONE DEI CONDUTTORI DI FASE [mm ²]	SEZIONE MINIMA CONDUTTORE DI TERRA [mm ²]
$S \leq 16$	S
$16 < S \leq 35$	16
$S > 35$	S / 2

In ogni caso la sezione del conduttore di terra non può essere inferiore a 2,5 mm² se è prevista una protezione meccanica e 4 mm² negli altri casi.

La connessione tra il conduttore di terra e il conduttore di protezione esterno deve essere resistente alla corrosione e non deve costituire parte dell'assemblaggio meccanico del convertitore.

Nell'eventualità di danneggiamento o disconnessione tra i due conduttori, deve essere previsto un dispositivo di protezione che intervenga per correnti di dispersione massime di 3.5mA AC o 10mA DC.

Se non fosse possibile installare tale dispositivo, è obbligatorio prevedere una connessione fissa e almeno una delle seguenti soluzioni:

1. Sezione del conduttore di terra esterno di almeno 10 mm² se in rame o 16 mm² se in alluminio.
2. Disconnessione automatica in caso di discontinuità di terra.
3. Installazione di un terminale addizionale per un secondo conduttore di terra di protezione.

In alternativa è possibile prevedere una connessione con un connettore industriale conforme alla norma IEC 60309 e sezione del conduttore di terra di almeno 2,5 mm².

8.1.4.2 Protezione di classe II

Un convertitore realizzato con protezione di classe II non deve essere dotato di morsetto di connessione per il conduttore di terra esterno, poiché una connessione a terra vanificherebbe il vantaggio di sicurezza apportato dall'isolamento doppio.

Tuttavia la norma permette l'utilizzo di un morsetto di connessione per il conduttore di terra per ragioni funzionali o di ammortizzamento delle sovratensioni, a patto di essere isolato dalle parti attive del convertitore.

¹⁹ Il dimensionamento dei conduttori di fase è riportato nella Tab. 9.4 a pag. 46

²⁰ Fonte: CEI EN 62109-1, Tab. 11, pag. 66



Il dispositivo dotato di protezione di classe II deve essere identificato dal simbolo riportato in Fig. 8.7.

Fig. 8.7 - Simbolo doppio isolamento²¹

8.1.4.3 Caratteristiche dell'isolamento

L'isolamento previsto per il convertitore deve rispettare determinati requisiti a seconda che sia installato all'aperto o in un ambiente chiuso, con o senza condizionamento.

Di seguito la Tab. 8.3 riassume le caratteristiche fondamentali richieste dalla norma per il grado di protezione IP, il range di temperatura ambientale e di umidità relativa e protezione dall'esposizione ai raggi UV.

Tab. 8.3 - Caratteristiche dell'isolamento in base alle condizioni di installazione²²

SPECIFICA	ESTERNO	INTERNO SENZA CONDIZIONAMENTO	INTERNO CON CONDIZIONAMENTO
PROTEZIONE IP (IEC 60529)	IP34	IP20	IP20
TEMPERATURA AMBIENTALE	-20°C / +50°C	-20°C / +50°C	0°C / +40°C
RANGE DI UMI- DITÀ	4% / 100% (con condensa)	5% / 95% (senza condensa)	5% / 85% (senza condensa)
ESPOSIZIONE UV	Richiesta	Non richiesta	Non richiesta

In particolari condizioni di inquinamento la norma richiede una protezione IP più stringente per evitare la penetrazione di corpi solidi nel convertitore, elevando il grado di protezione ad IP5X, o dei corpi liquidi con IPX8.

Anche a seguito di una sovratensione si può riscontrare un cedimento dell'isolamento del sistema, per questo la norma determina quattro categorie di sovratensione:

1. Categoria I: dispositivi connessi a circuiti con misure di protezione contro la sovratensione.
2. Categoria II: dispositivi non connessi permanentemente a installazioni fisse.
3. Categoria III: dispositivi connessi permanentemente a installazioni fisse a valle di derivazioni.
4. Categoria IV: dispositivi connessi permanentemente a installazioni fisse a monte di derivazioni.

Nella Tab. 8.4 si riportano i principali valori di tensione operativa con relativi valori di sovratensione di tenuta e temporanea per le categorie I, II e IV.

²¹ Fonte: CEI EN 62109-1, Annex C, Fig. C-1, num. 12, pag. 134

²² Fonte: CEI EN 62109-1, Tab. 4, pag. 46-47

Tab. 8.4 - Sovratensione di tenuta dell'isolamento²³

TENSIONE INSTALLAZIONE	SOVRATENSIONE DI TENUTA			SOVRATENSIONE TEMPORANEA
	CAT. I	CAT. II	CAT. IV	
50VAC o 71VDC	330V	500V	1500V	1250V
300VAC o 424VDC	1500V	2500V	6000V	1500V
600VAC o 849 VDC	2500V	4000V	8000V	1800V
1000VAC o 1500VDC	4000V	6000V	12000V	2200V

Applicando la casistica al sistema di accumulo, si ha che la categoria I è applicabile ad installazioni con misure di sicurezza esterne, la categoria II ai sistemi fotovoltaici e la categoria IV a convertitori direttamente connessi al generatore senza protezioni.

La norma riporta inoltre delle tabelle utili a progettare correttamente la dimensione degli isolanti a seconda di vari parametri quali tensione nominale, sovratensione, inquinamento e materiali, tuttavia questo aspetto non è tenuto in considerazione nella trattazione del presente documento in quanto esula dalle finalità di comprensione del rischio elettrico associato ai convertitori.

8.2 Protezione contro i pericoli derivanti dall'energia

Un livello energetico è considerato pericoloso al verificarsi di una delle due seguenti condizioni:

1. La tensione è superiore a 2V e la potenza disponibile eccede i 240VA dopo 60 secondi.
2. La tensione dei condensatori è superiore a 2V e l'energia immagazzinata $E = \frac{1}{2}CV^2$ supera i 20J, dove C è il valore della capacità.

Il rischio elettrico si viene a creare nel momento in cui un oggetto metallico crea un cortocircuito tra due parti nude a livello di energia pericolosa.

La probabilità che avvenga un ponte tra due parti attive deve essere determinata dal costruttore, verificata tramite l'utilizzo del dito di prova e limitata con l'adozione di dispositivi di sicurezza o impedimenti fisici.

L'energia accumulata deve essere ridotta ad un valore inferiore ai 20J in un tempo massimo di 10 secondi o, se non fosse possibile rispettare tale prescrizione, la parte pericolosa deve essere protetta da una barriera e deve essere indicato chiaramente il tempo di attesa per accedere in sicurezza ad essa.



Per le parti che conservano un livello energetico pericoloso per scopi funzionali, come le batterie, devono essere protette dai contatti accidentali con barriere o isolamento e deve essere riportato il simbolo di rischio elettrico indicato in Fig. 8.8.

Fig. 8.8 - Simbolo pericolo di shock elettrico²⁴

²³ Fonte: CEI EN 62109-1, Tab. 12, pag. 71

²⁴ Fonte: CEI EN 62109-1, Annex C, Fig. C-1, num. 13, pag. 134

8.3 Protezione contro il pericolo d'incendio

Un'apparecchiatura costruita a norma deve essere immune al rischio di incendio e tale prescrizione si soddisfa grazie all'uso di materiali e componenti appropriati.

Questo rischio viene ridotto attraverso la limitazione della massima temperatura dei componenti nelle condizioni di funzionamento normale e dopo un singolo guasto o mediante la limitazione della potenza disponibile nel circuito.

Fondamentale per soddisfare la prescrizione è l'utilizzo di un involucro resistente al fuoco che protegge le seguenti parti critiche:

1. Componenti del circuito primario.
2. Componenti del circuito secondario che eccedono il limite di corrente.
3. Componenti che possono essere soggetti ad archi elettrici.

In questo testo verranno trascurati gli accorgimenti da adottare a livello di scelta dei materiali, mentre verranno analizzate le limitazioni elettriche riportate nella norma.

Le parti che eccedono il limite di corrente devono essere protette per mezzo di involucri idonei ad evitare o contenere il rischio di incendio.

Tale limite è definito dalla norma ed è verificato se si riscontrano i seguenti criteri:

1. L'uscita è limitata o un'impedenza la limita in accordo con la Tab. 8.5.
2. Un sistema di controllo o una rete di regolazione limita l'uscita sia in condizioni di uso normale che di singolo guasto in accordo con la Tab. 8.5.
3. È utilizzato un dispositivo per la protezione contro le sovracorrenti e l'uscita è limitata in accordo con la Tab. 8.6.

Tab. 8.5 - Protezione da incendio per fonti di energia limitate²⁵

TENSIONE D'USCITA U_{oc}		CORRENTE D'USCITA I_{sc}	POTENZA APPARENTE S
V AC	V DC	A	VA
≤ 20	≤ 20	≤ 8	$\leq 5 \cdot U_{oc}$
$20 < U_{oc} \leq 30$	$20 < U_{oc} \leq 30$	≤ 8	≤ 100
-	$30 < U_{oc} \leq 60$	$\leq 150/U_{oc}$	≤ 100

Tab. 8.6 - Protezione da incendio per fonti di energia non limitate²⁶

TENSIONE D'USCITA U_{oc}		CORRENTE D'USCITA I_{sc}	POTENZA APPARENTE S	PROTEZIONE SOVRACORR.
V AC	V DC	A	VA	A
≤ 20	≤ 20	$\leq 1000/U_{oc}$	≤ 250	≤ 5
$20 < U_{oc} \leq 30$	$20 < U_{oc} \leq 30$			$\leq 100/U_{oc}$
-	$30 < U_{oc} \leq 60$			$\leq 100/U_{oc}$

²⁵ Fonte: CEI EN 62109-1, Tab. 22, pag. 101

²⁶ Fonte: CEI EN 62109-1, Tab. 23, pag. 101

Per tutti i convertitori che non rispettano i limiti di potenza precedentemente enunciati devono essere previste protezioni contro i cortocircuiti e le sovracorrenti per i circuiti di ingresso e uscita.

Se un dispositivo di protezione interrompe il conduttore di neutro, questo deve interrompere simultaneamente anche gli altri conduttori dello stesso circuito non a terra.

I dispositivi di protezione possono essere installati esternamente all'apparecchiatura previa esplicita comunicazione sul manuale di istruzioni per l'installazione.

La protezione contro il cortocircuito, tipicamente un fusibile o un dispositivo elettromeccanico a taratura fissa e reset manuale, deve avere un'adeguata capacità di interruzione della massima corrente di cortocircuito alla specifica porta a cui è connesso.

Da tenere in considerazione c'è anche il pericolo introdotto dalla sovratemperatura che si può verificare all'interno dell'involucro del convertitore in condizioni di singolo guasto.

Questi dispositivi di protezione possono essere resettati automaticamente solo se la parte che proteggono non è più operativa e inoltre devono:

1. Garantire un funzionamento affidabile.
2. Interrompere la tensione e la corrente massima nel circuito in cui sono usati.
3. Non operare in condizioni di uso normale.

8.4 Condizioni di prova

In questo paragrafo vengono specificate le condizioni che il convertitore deve rispettare per ritenere valide le varie prove ai fini della conformità.

La norma specifica che la sequenza delle prove effettuate sul dispositivo è facoltativa e che non è necessario utilizzare lo stesso campione per tutte le prove, se non diversamente specificato.

La presenza di danni va verificato sull'EUT (Equipment Under Test) a seguito di ogni prova.

Le condizioni ambientali fissate dalla norma per la corretta esecuzione dei test sono le seguenti:

1. Temperatura compresa tra 15°C e 40°C
2. Umidità relativa tra il 5% e il 75%
3. Pressione atmosferica tra i 75kPa e 106kPa
4. Assenza di brina, rugiada, infiltrazioni d'acqua, radiazione solare, ecc.

I test devono essere eseguiti su parti elettriche e meccaniche di prodotti di produzione futura, per far sì che le valutazioni effettuate portino all'effettiva sicurezza dei dispositivi commercializzati.

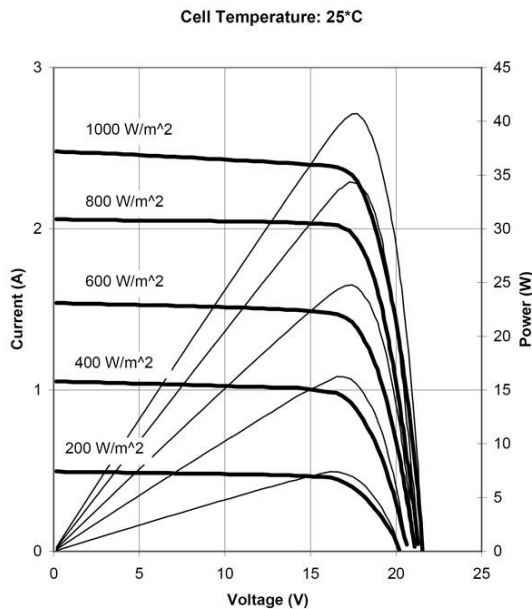
L'apparecchio di prova deve essere installato secondo le istruzioni del produttore in una configurazione che ne determina le condizioni operative peggiori, come l'effetto della ventilazione, l'incastro a muro, la prossimità di strutture, ecc.

8.4.1 Condizioni delle porte di ingresso

Per le verifiche i cui risultati possono essere significativamente interessati dalle condizioni di alimentazione in ingresso, il test deve essere eseguito nella situazione più sfavorevole, tenendo in considerazione le condizioni e tolleranze di seguito specificate:

1. Tensione: la tolleranza deve essere compresa tra il 90% e il 110%, a meno di una gamma più ampia indicata nelle specifiche. Se il test da esito negativo, devono essere specificate le tolleranze utilizzate nelle quali avviene un corretto funzionamento del dispositivo.

2. Frequenza: deve essere valutata la frequenza nominale di rete di 50Hz, le tolleranze non devono essere prese in considerazione.
3. Messa a terra: l'unità può essere testata con alimentazione di prova proveniente da un sistema collegato a terra o non, viene ritenuta valida la condizione più sfavorevole di alimentazione che determina la situazione di caso peggiore.
4. Protezione contro le sovracorrenti: l'ingresso deve essere equipaggiato contro le sovracorrenti. Questa protezione non deve essere attiva in condizioni normali, ma può funzionare durante i test di singolo guasto.



Per l'ingresso da fonte di energia fotovoltaica, quando i test possono essere influenzati dalla caratteristica I-V della sorgente, viene simulata la condizione in cui si hanno i valori di tensione di circuito aperto V_{max} o di corrente di cortocircuito I_{sc} .

I test in condizioni anomale devono essere eseguiti con una corrente massima nominale di cortocircuito I_{sc} moltiplicata per 1,25-1,5.

Come riportato dalla Fig. 8.9, la curva caratteristica dei moduli fotovoltaici può presentare al più una delle due condizioni maggiormente sfavorevoli, cioè tensione di circuito aperto o corrente di cortocircuito, quindi queste vanno considerate in maniera separata durante l'esecuzione dei test.

Fig. 8.9 - Curva caratteristica I-V moduli fotovoltaici²⁷

Per quel che riguarda le batterie, se la corrente di guasto in ingresso può essere influente, durante il test deve essere prevista anche l'interconnessione dell'EUT ad un accumulatore.

8.4.2 Condizioni delle porte di uscita

Ai fini della prova le porte di uscita devono essere collegate ad uno o più carichi lineari in corrente alternata e ad uno o più carichi resistivi in corrente continua, per ottenere la potenza nominale e la corrente di uscita massima.

La tolleranza accettata tra il valore riportato nel manuale del convertitore e quello effettivo non deve eccedere il 10%, sia per le correnti e le potenze in ingresso che in uscita.

Se la porta è destinata ad essere collegata ad una batteria e i risultati possono essere affetti negativamente dalla connessione, un accumulatore deve essere collegato al posto o in parallelo al carico.

Queste condizioni di carico devono essere mantenute per un periodo specificato dalla norma:

1. Per le caratteristiche nominali di funzionamento continuo, fino alla creazione di condizioni permanenti, il test è limitato a sette ore a piena potenza, ad eccezione dei casi in cui l'unica alimentazione in ingresso è quella fotovoltaica.
2. Per il funzionamento intermittente vengono considerati periodi assegnati "on" e "off".

²⁷ Fonte: <http://solarpowerplanetearth.com/>

3. Per brevi periodi operativi viene valutato il tempo di funzionamento nominale.

Un terminale del conduttore di protezione deve essere messo a terra e deve essere disponibile la protezione da cortocircuito.

8.4.3 Prove termiche

Le prove termiche vengono eseguite allo scopo di evitare i rischi dovuti a temperature superiori a quelle di sicurezza che potrebbero portare al cedimento di materiali isolanti e plastici e compromettere i componenti elettrici e meccanici durante il funzionamento normale, influenzando peraltro la vita utile del componente stesso.

Per le apparecchiature di conversione destinate ad essere utilizzate in ambienti con temperature fino a 50°C, la prova può essere eseguita nell'intervallo tra 15°C e 40°C, mentre per quelle destinate ad ambienti con temperature superiori ai 50°C la prova va eseguita alla temperatura ambiente nominale massima $\pm 5^\circ\text{C}$.

La differenza tra la temperatura ad inizio e fine prova vanno registrate al fine di poter effettuare il confronto con dei limiti specifici.

Durante le prove termiche in condizioni normali, i dispositivi di protezione di altri sistemi non devono essere in funzione.

Le temperature devono essere misurate utilizzando termocoppie, salvo trasformatori, induttori e altre bobine per i quali è possibile utilizzare il metodo di misurazione della resistenza

$$T = \frac{R2}{R1(k + t1) - (k + t2)}$$

dove T è l'aumento di temperatura in °C, R1 e R2 sono rispettivamente le resistenze ad inizio e fine prova, t1 e t2 sono le temperature ad inizio e fine prova, k=234,5 per il rame e k=225,0 per l'alluminio.

Vi sono delle limitazioni da rispettare per trasformatori, induttori e altri componenti per cui è specificata una temperatura inferiore da altre normative o dal fabbricante del componente.

8.4.4 Prove a guasto singolo

I test in condizioni di guasto singolo vengono eseguiti per constatare che non si presenti alcuna condizione di pericolo dovuta al verificarsi di un guasto durante l'uso normale o scorretto ragionevolmente prevedibile.

Le condizioni di guasto devono essere applicate singolarmente per verificare la sicurezza dell'apparecchiatura, tuttavia è prevista la possibilità di un secondo default derivante dal primo.

L'apparecchiatura deve continuare a funzionare fino a quando non interviene un evento esterno, come l'apertura di un dispositivo di protezione, sia manuale che automatico.

La protezione contro i pericoli derivanti da scossa elettrica è verificata se:

1. Il dispositivo è di tipo DVC-A o è protetto contro qualsiasi contatto da almeno un isolamento principale.
2. Un fusibile collegato tra il terminale di terra e il conduttore di terra, con valore di 3A per circuiti protetti da sovracorrenti non superiori a 30A o con valore compreso tra 30A e 35A per circuiti con protezione eccedenti i 30A, non deve essere aperto al termine della prova.

Su ogni componente che, a seguito di un guasto singolo, può presentare un pericolo elettrico o d'incendio, deve essere eseguita un'analisi che verifichi i possibili eventi a rischio che si potrebbero riscontrare durante l'uso normale, comprendendo gli effetti dati dalle condizioni di circuito aperto e cortocircuito.

Le porte di uscita devono essere testate una ad una per simulare il possibile cortocircuito dei cavi o del carico ad esse connesso, così come le porte di ingresso delle apparecchiature connesse contemporaneamente a più fonti di alimentazione devono essere anch'esse testate una ad una mediante cortocircuito per determinare se in condizione di guasto la corrente di una fonte di alimentazione può interferire con un'altra adiacente.

In entrambi i casi la protezione contro le sovracorrenti deve essere attiva se è fornita con il convertitore o ne è previsto il successivo montaggio nel manuale di installazione.

Le porte di uscita devono essere sottoposte anche a test di sovraccarico che viene eseguito mediante una resistenza variabile.

Se è prevista una protezione contro le sovracorrenti, la corrente di test corrisponde alla massima corrente che il dispositivo permette di circolare per 1 ora.

Per i convertitori che in caso di sovraccarico decrementano la tensione di uscita, il carico di test deve essere incrementato per ottenere la massima potenza di uscita.

In tutti gli altri casi, il carico è la massima potenza di uscita ottenibile dal convertitore.

8.4.5 Protezione contro il ritorno di tensione

In condizioni di uso normale e di singolo guasto non devono essere presenti ai morsetti di ingresso tensioni o livelli di energia pericolosi quando una fonte di alimentazione è disattiva.

Il convertitore a tale scopo deve funzionare esclusivamente quando tutte le fonti forniscono tensione ai morsetti di ingresso.

Per esaminare la conformità ogni ingresso deve essere testato singolarmente disattivando la fonte ad esso collegata e verificando il possibile trasferimento di energia tra le diverse fonti connesse.

Il dispositivo supera positivamente la prova se non si presentano condizioni di pericolo alla porta di ingresso in questione dopo 15 secondi dalla disconnessione della fonte di alimentazione.

8.5 Sommario

La trattazione di questa norma mette in evidenza quelle che sono alcune soluzioni tipiche da adottare in svariati prodotti al fine di renderli sicuri verso gli utenti e gli operatori.

Nel caso specifico dei convertitori viene introdotta la classificazione delle apparecchiature in base alla tensione operativa, la necessità di predisporre un isolamento principale adeguato e la possibilità di limitare l'uscita per evitare i contatti accidentali a rischio.

In seguito è stata esaminata l'esigenza di predisporre l'installazione di dispositivi di protezione esterni all'apparecchiatura, senza precisarne il dimensionamento.

Si è visto inoltre che l'apparecchiatura deve essere in grado di continuare ad operare in condizioni anomale e di guasto, senza pregiudicare la sicurezza delle persone e l'integrità del dispositivo.

9. NORMATIVA CEI EN 62040-1 – SISTEMI STATICI DI CONTINUITÀ (UPS)

La norma CEI EN 62040 “Sistemi statici di continuità (UPS)” introduce le prescrizioni di sicurezza applicabili ai gruppi statici destinati ai sistemi di distribuzione in bassa tensione.

Il sistema di accumulo comprende, tra le proprie funzionalità, l'intervento tempestivo in caso di blackout e buchi di tensione della rete, allo scopo di garantire la continuità di corrente alternata alle utenze e di migliorare la qualità della sorgente di alimentazione.

Come avvenuto nei precedenti capitoli, nel prosieguo verranno esaminate le disposizioni indicate nella norma per dichiarare il sistema conforme.

In particolar modo verranno analizzati i dispositivi di protezione interponibili tra le apparecchiature del sistema di accumulo e la rete elettrica, andando così ad integrare le prescrizioni già analizzate in precedenza.

Lo scopo normativo precisa che il documento deve essere utilizzato congiuntamente alla CEI EN 60950-1 “Apparecchiature per la tecnologia dell'informazione-Sicurezza” e si applica, come già detto, ai sistemi provvisti di un dispositivo di accumulo per l'energia elettrica.

La norma tratta due tipi di apparecchiature, quelle a spina e quelle installate in modo permanente, tuttavia risulta di interesse per il presente elaborato esclusivamente la tipologia ad installazione fissa.

9.1 Prescrizioni fondamentali

Le protezioni contro la scossa elettrica devono essere scelte accuratamente sul principio base che l'operatore può accedere a:

1. Parti nude dei circuiti SELV.
2. Parti nude dei circuiti a corrente limitata.
3. Circuiti TNV in specifiche condizioni.

In particolar modo in questa analisi si farà riferimento esclusivamente ai primi due punti.

Un circuito è definito SELV²⁸ quando la tensione massima tra due conduttori qualsiasi del circuito o tra un conduttore e la terra non supera le tensioni di 42,4V AC di picco o 60V DC.

In caso di guasto le tensioni precedentemente indicate non devono essere superate per più di 0,2 secondi e non deve mai essere superato il limite di 71V AC di picco o 120V DC.

Un circuito è a corrente limitata se per frequenze inferiori a 1kHz la corrente misurata ai capi di un resistore non induttivo di 2kΩ non supera i 0,7mA AC di picco o 2mA DC. Per frequenze superiori il valore della corrente ammissibile deve essere moltiplicato per il valore della frequenza, fino ad un limite di 70mA.

Oltre a quanto premesso in precedenza, deve essere assicurata la sicurezza contro il contatto e il cortocircuito accidentale per le parti accessibili all'operatore quali:

1. Parti nude a tensione pericolosa.
2. Presenza del solo isolamento fondamentale o funzionale per circuiti ELV.

²⁸ SELV è l'acronimo di Safety Extra Low Voltage ed ha caratteristiche elettriche e fisiche differenti dal DVC-A definito nel Cap.8.

Un dispositivo SELV ha limiti di tensione diversi e deve avere un isolamento doppio o schermo metallico a terra, mentre tale prescrizione non è strettamente necessaria per un circuito DVC-A.

Risulta che un dispositivo DVC-A può non essere necessariamente di categoria III, o equivalentemente SELV.

3. Parti conduttrici non messe a terra.
4. Parti a livello di energia elevato.

La protezione dai rischi introdotti da queste parti del sistema deve essere garantita mediante isolamento, dispositivi di protezione o uso di interblocchi.

Deve essere prevista anche una porzione di circuito che provvede alla scarica dei condensatori collegati al circuito primario, in caso di disconnessione, in un tempo massimo di 10 secondi.

Il contatto con parti nude a tensione pericolosa di un circuito secondario è ammesso, tuttavia è necessaria una protezione al fine di evitare il contatto accidentale e, in caso di livelli di energia elevati, il cortocircuito involontario.

Per gli impianti connessi in rete il sistema deve assicurare la protezione contro un probabile ritorno di tensione verso la rete stessa durante il funzionamento a batteria e quando l'alimentazione primaria è stata interrotta.

Le seguenti indicazioni si applicano anche agli impianti ad isola in quanto a seguito di una disconnessione del generatore, sia in corrente continua che alternata, si può presentare una tensione pericolosa ai morsetti di alimentazione primaria data dalla batteria.

In tale evenienza la norma prescrive che non deve esserci alcun rischio di scossa elettrica ai morsetti di alimentazione dopo 15 secondi per gli impianti installati in modo permanente e tale condizione può essere soddisfatta mediante:

1. Dispositivo di sezionamento dell'ingresso in corrente alternata.
2. Distanza in aria.

Per la prima soluzione il fornitore del sistema deve indicare un dispositivo di sezionamento adeguato, mentre per la seconda viene applicata la norma che prescrive una distanza di 10mm se deve fungere da isolamento rinforzato o 2mm se ha funzione di isolamento fondamentale.

Il sistema deve essere munito anche di un dispositivo di interruzione di emergenza che impedisca la prosecuzione dell'alimentazione del carico in qualsiasi modalità operativa.

Infine nel caso di alimentazione di una sorgente a potenza limitata deve essere incorporato un trasformatore di isolamento unitamente ad una delle seguenti soluzioni:

1. Dispositivo di protezione contro le sovracorrenti, come ad esempio un fusibile.
2. Uscita limitata da una rete di regolazione, ad esempio per $U_o \leq 20V$ AC o DC la corrente massima deve essere $I_{sc} \leq 8A$.

9.2 Messa a terra e collegamento equipotenziale

In modo analogo a quanto fatto nel paragrafo 8.1.4, la norma definisce la classe I, II e III per le apparecchiature in base all'isolamento disponibile.

È prescritta la messa a terra di protezione obbligatoria per tutte quelle parti che potrebbero trasportare correnti di guasto, al fine di azionare dispositivi di protezione contro le sovracorrenti:

1. Parti conduttrici accessibili che potrebbero andare in tensione pericolosa in caso di singolo guasto.
2. Parti che dovrebbero essere messe a terra per preservare l'integrità dei circuiti SELV.

Nel caso in cui una parte a tensione pericolosa non possa essere messa a terra, deve essere apposta un'opportuna etichetta ad avvertire del rischio di scossa elettrica, come in Fig. 8.8.

Per i sistemi in classe I con isolamento principale o funzionale viene prescritto l'obbligo del collegamento ad un morsetto di terra posto internamente all'apparecchiatura, mentre questa connessione è vietata per i dispositivi con isolamento doppio o rinforzato.

Inoltre è richiesta la messa a terra anche degli schermi dei trasformatori e componenti che potrebbero presentare un tensione non pericolosa in caso di singolo guasto, ma che potrebbe danneggiare l'isolamento.

I conduttori di terra di protezione con connettono il dispositivo e la terra dell'edificio non devono avere una resistenza eccessiva, non devono essere interrompibili da dispositivi di protezione contro le sovracorrenti e la sezione deve essere determinata mediante l'uso della Tab. 8.2.

Risulta che le sezioni dei conduttori di terra di protezione interni ed esterni all'apparecchiatura devono essere uguali, in quanto in caso di guasto la corrente circolante è identica per entrambi.

Il morsetto principale di collegamento che permette la messa a terra di protezione deve essere dimensionato per supportare il valore nominale della corrente dell'ingresso di alimentazione e per resistere all'allentamento accidentale del conduttore.

Per essere dichiarato a norma deve rispettare il dimensionamento minimo riportato nella Tab. 9.2:

Tab. 9.1 - Dimensionamento morsetto di connessione per terra di protezione²⁹

CORRENTE NOMINALE DEL CIRCUITO [A]	DIAMETRO NOMINALE MINIMO DELLA PARTE FILETTATA [mm]	
	A BUSSOLA O PERNO	A VITE
$10 < I_{nom} \leq 16$	3,5	4,0
$16 < I_{nom} \leq 25$	4,0	5,0
$25 < I_{nom} \leq 32$	4,0	5,0
$32 < I_{nom} \leq 40$	5,0	5,0
$40 < I_{nom} \leq 63$	6,0	6,0

Tale morsetto per le apparecchiature installate in modo permanente deve essere:

1. Posto in una posizione facilmente accessibile.
2. Munito di morsetti a bussola, a perno, a vite o analoghi se è necessario un conduttore di sezione superiore a 7mm².

Il sistema deve prevedere un numero sufficiente di morsetti per permettere il collegamento equipotenziale tra tutte le apparecchiature di classe I, comprese le masse estranee quali ad esempio eventuali armadi per il contenimento dei dispositivi e delle batterie.

Per ogni morsetto è ammessa la connessione ad un solo conduttore, in caso contrario deve essere progettato appositamente per collegare due o più conduttori.

9.3 Sezionamento circuiti a corrente continua e a corrente alternata

Il dispositivo di sezionamento del circuito a corrente alternata in uscita dal convertitore è necessario per permettere la manutenzione del sistema di accumulo.

²⁹ Fonte: CEI EN 60950, Tab. 3E, pag. 118

Questo deve essere incorporato nell'apparecchiatura, a meno che il costruttore non dichiari tra le istruzioni di installazione la necessità di un sezionatore che deve essere previsto nell'impianto elettrico dell'edificio.

In entrambi i casi i dispositivi di sezionamento considerati idonei sono i seguenti:

1. Interruttori sezionatori.
2. Interruttori automatici.

Se le sorgenti di alimentazione sono molteplici devono essere installati un numero equivalente di interruttori di sezionamento con relativa marcatura che li contraddistingua, mentre eventuali parti che rimangono in tensione a seguito del sezionamento devono essere protette per mezzo di barriere.

Per le apparecchiature monofase il sezionatore deve scollegare entrambi i poli, tuttavia nel caso in cui sia ben identificabile il conduttore del neutro della rete in corrente alternata è sufficiente un dispositivo di sezionamento unipolare.

Per le apparecchiature trifase il sezionatore deve scollegare simultaneamente tutti i conduttori di fase della rete in corrente alternata, mentre per un sistema IT il dispositivo di sezionamento deve essere quadripolare per consentire anche la disconnessione del conduttore di neutro.

Devono essere installati anche dispositivi di sezionamento che scollegano tutti i conduttori non messi a terra per le alimentazioni interne o esterne in corrente continua, come ad esempio il pacco batterie.

9.4 Protezione contro sovracorrenti e guasti a terra

La protezione contro le sovracorrenti, i cortocircuiti e i guasti a terra nei circuiti di entrata e di uscita deve essere fornita come parte integrante delle apparecchiature o come parte dell'impianto dell'edificio.

Nel caso in cui sia una protezione installata nell'impianto dell'edificio a dover garantire la sicurezza, il costruttore deve specificare il valore efficace della corrente di guasto che può verificarsi nelle condizioni più sfavorevoli.

La protezione dai cortocircuiti deve fornire un'adeguata capacità di interruzione e deve intervenire entro 5 secondi, allo scopo di ridurre il rischio di scossa elettrica e prevenire il pericolo di incendio.

Tali dispositivi devono essere quantificati in un numero sufficiente per interrompere la sovracorrente che può circolare in ogni possibile via di corrente di guasto, come tra fase e fase, tra fase e neutro o tra fase e conduttore di terra di protezione, mentre non è richiesta alcuna protezione per le apparecchiature non connesse a terra o con isolamento doppio o rinforzato.

Inoltre se il dispositivo alimenta un carico con più di una fase, devono essere interrotti tutti i conduttori di alimentazione anche se solo su uno di essi è stata rilevata una sovracorrente.

Di seguito sono riportate due tabelle, Tab. 9.2 e Tab. 9.3, che descrivono le possibili casistiche per la connessione a reti monofase e trifase.

Tab. 9.2 - Protezione contro guasti a terra e sovracorrenti per impianti monofase³⁰

CONNESSIONE ALL'ALIMENTAZ.	PROTEZIONE CONTRO	# MINIMO FUSIBILI O POLI SEZIONATORE	POSIZIONAMENTO
Caso A: neutro a terra identificato in modo sicuro, eccetto caso C	Guasti a terra	1	Conduttore di fase
	Sovracorrente	1	Uno dei conduttori
Caso B: alimentazione qualsiasi, compresi i sistemi IT, eccetto caso C	Guasti a terra	2	Entrambi i conduttori
	Sovracorrente	1	Uno dei conduttori
Caso C: alimentazione a 3 fili con neutro a terra identificato in modo sicuro	Guasti a terra	2	Ogni conduttore fase
	Sovracorrente	2	Ogni conduttore fase

Tab. 9.3 - Protezione contro guasti a terra e sovracorrenti per impianti trifase³¹

CONNESSIONE ALL'ALIMENTAZ.	# CAVI ALIM.	PROTEZ. CONTRO	# MINIMO FUSIBILI O POLI SEZIONATORE	POSIZIONAMENTO
Trifase senza neutro	3	Guasti a terra	3	Tutti i 3 conduttori
		Sovracorrente	2	Due conduttori qualsiasi
Con neutro a terra (TT o TN)	4	Guasti a terra	3	Ogni conduttore fase
		Sovracorrente	3	Ogni conduttore fase
Con neutro non a terra	4	Guasti a terra	4	Tutti i 4 conduttori
		Sovracorrente	3	Ogni conduttore fase

Deve essere prevista inoltre la protezione contro le sovracorrenti e i guasti a terra del circuito di alimentazione della batteria.

In questo caso per il dimensionamento dei dispositivi di protezione si deve tenere conto della corrente nominale che circola nei conduttori che collegano le batterie ai convertitori

9.5 Interblocchi di sicurezza

Gli interblocchi di sicurezza hanno lo scopo di eliminare il pericolo di shock elettrico o trasferimento dell'energia prima che eventuali coperchi o sportelli siano completamente rimossi, per questo motivo devono soddisfare almeno una delle due condizioni seguenti:

1. Necessità di un preventivo scollegamento dell'alimentazione.
2. Sconnessione automatica dell'alimentazione, abbassamento a tensione SELV entro 2 secondi e livello di energia inferiore a 20J.

Deve essere garantita anche l'insensibilità al ripristino inavvertito in caso di coperchio o sportello aperto.

³⁰ Fonte: CEI EN 60950, Tab. 2E, pag. 70

³¹ Fonte: CEI EN 60950, Tab. 2F, pag. 70

Al fine di ottenere un adeguato livello di protezione, l'accesso ad un componente, anche se in tensione o ad un livello di energia pericoloso, non deve essere impedito dal cablaggio o da altri componenti.

Nel caso sia richiesto un utensile per eseguire delle regolazioni, deve essere previsto un adeguato isolamento o una distanza sufficiente tra le parti attive onde evitare cortocircuiti accidentali.

Eventuali banchi di condensatori devono essere scaricati entro 1 secondo dall'apertura dell'interblocco, tuttavia se non è possibile rispettare tale prescrizione è possibile innalzare il tempo di scarica fino a 5 minuti apponendo sul coperchio un'etichetta che indichi il tempo necessario per poter accedere al circuito interno in sicurezza.

9.6 Cablaggi, connessioni e alimentazione

La connessione alla rete in corrente alternata deve essere eseguita tramite cavi adeguatamente dimensionati per la corrente circolante, in quanto una sezione troppo ridotta può causare un surriscaldamento e danneggiare l'isolamento.

Per i diversi circuiti in ingresso e in uscita devono essere forniti punti di connessione diversi, adeguatamente separati uno dall'altro.

La dimensione minima dei conduttori di potenza deve essere in accordo con la corrente nominale circolante e deve rispettare la Tab. 9.4, la quale riporta esclusivamente alcuni valori indicati dalla norma.

Tab. 9.4 - Sezione conduttori di fase³²

CORRENTE NOMINALE DEL CIRCUITO [A]	DIMENSIONI MINIME DEL CONDUTTORE [mm²]
10 < I _{nom} ≤ 16	1,5
16 < I _{nom} ≤ 25	2,5
25 < I _{nom} ≤ 32	4
32 < I _{nom} ≤ 40	6
40 < I _{nom} ≤ 63	10
63 < I _{nom} ≤ 80	16
80 < I _{nom} ≤ 100	25

Eventuali conduttori del neutro nei sistemi trifase devono essere dimensionati in modo tale da tener conto di possibili correnti armoniche che si possono sommare a seguito dell'applicazione di un carico monofase.

9.7 Sommario

In questo capitolo, seppur si sia analizzata una norma di prodotto, sono stati introdotti dei concetti importanti che permettono di stabilire le tipologie di protezioni esterne da aggiungere al sistema di accumulo e di dimensionarle in maniera idonea.

³² Fonte: CEI EN 60950, Tab. 3B, pag. 113

Si è esaminata la stringente necessità di realizzare una messa a terra a regola d'arte e di predisporre un dispositivo di sezionamento a monte di ogni apparecchiatura al fine di assicurarne la protezione in caso di guasto e garantirne la sicurezza elettrica durante la manutenzione.

Per ottenere un corretto funzionamento delle apparecchiature e delle protezioni, devono essere dimensionati anche i cavi e i morsetti di connessione in base alla corrente nominale del dispositivo e della batteria.

Infine sono state evidenziate le prescrizioni riguardanti il numero e le tipologie di protezioni contro i guasti a terra e le sovracorrenti in relazione alla tipologia di rete in cui verrà installato il sistema.

10. NORMATIVA CEI EN 50272-2 – PRESCRIZIONI DI SICUREZZA PER BATTERIE DI ACCUMULATORI E LORO INSTALLAZIONI

La norma tratta le prescrizioni da adottare per ottenere un livello di sicurezza accettabile nei locali batterie per applicazioni stazionarie con tensione massima di 1.500V in corrente continua, al fine di prevenire i rischi legati ad elettricità, emissione di gas e di elettrolito.

Le tipologie di batterie analizzate sono quelle al piombo e al nichel cadmio, quest'ultime ignorate in quanto non contemplate nella trattazione del presente documento, con le possibili applicazioni che comprendono i sistemi ad energie rinnovabili e gli UPS.

La normativa in particolare si basa sulle prescrizioni contenute nelle norme di prodotto analizzate in precedenza per poter fornire delle disposizioni che garantiscono la sicurezza del luogo di installazione.

10.1 Protezione contro i contatti diretti e indiretti

Per assicurare un'adeguata protezione contro i contatti diretti è permessa l'installazione di barriere o ostacoli o la collocazione dei dispositivi fuori portata.

Per le batterie con tensione nominale compresa tra 60V e 120V tra i morsetti o verso terra deve essere predisposta l'installazione in luoghi ad accesso limitato, mentre per accumulatori con tensione superiore a 120V è prescritto il posizionamento in luoghi chiusi a chiave debitamente marcati con etichette di avvertimento.

Le batterie con tensione nominale inferiore a 60V non richiedono particolari protezioni a patto che siano di tipo SELV o PELV³³.

Nel caso in cui si faccia uso di barriere o involucri il grado minimo di protezione fornito deve essere IP2X o IPXXB.

La protezione contro i contatti indiretti tipicamente avviene grazie alla sconnessione automatica dell'alimentazione a seguito di un guasto, mentre la tipologia di intervento dipende dal sistema che adotta l'impianto elettrico presente presso l'utilizzatore finale.

La rilevazione del guasto avviene grazie all'uso di un conduttore di protezione verso terra, non scollegabile da alcun dispositivo di protezione e non interruttibile da fusibili o altri dispositivi contro le sovracorrenti.

Gli armadietti o i supporti delle batterie di tipo metallico devono essere connessi al conduttore di protezione, essendo ritenute masse che potrebbero andare in tensione a seguito del cedimento dell'isolamento principale.

Nei sistemi TN-C e TN-S il polo positivo o negativo della batteria deve essere collegato a terra mediante lo stesso conduttore utilizzato per porre a terra le masse dei carichi connessi alla rete, così come riportato in Fig. 10.1 e Fig. 10.2.

Il tempo di sconnessione per questi tipi di sistemi deve essere inferiore a 5 secondi a seguito del guasto e il conduttore di protezione deve avere sezione minima di 10 mm².

³³ PELV è l'acronimo di Protective Extra Low Voltage ed è molto simile al SELV, con l'unica differenza che un punto qualsiasi del circuito deve essere messo a terra. Ciò lo rende meno sicuro.

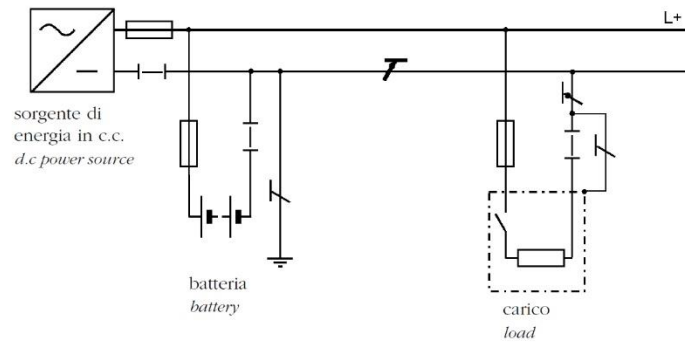


Fig. 10.1 - Sistema TN-C³⁴

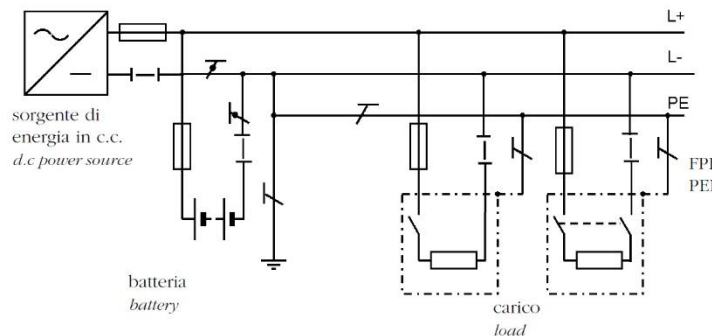


Fig. 10.2 - Sistema TN-S³⁵

Nel sistema TT il polo positivo o negativo deve essere collegato a terra, mentre le altre masse dell'impianto elettrico, a differenza dei sistemi TN, devono essere messe a terra tramite un dispersore differente come in Fig. 10.3.

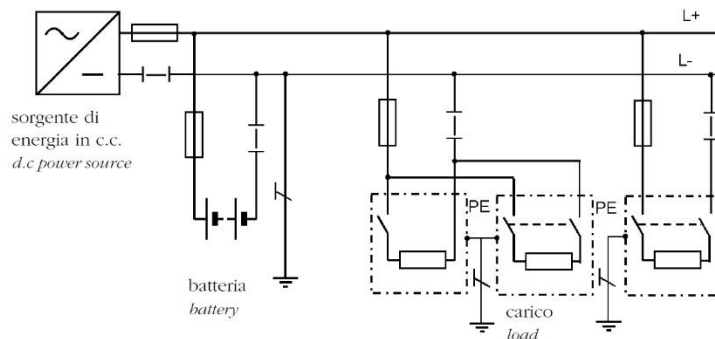


Fig. 10.3 - Sistema TT³⁶

Il tempo di intervento deve essere inferiore a 5 secondi dal rilevamento del guasto se si utilizzano dispositivi di protezione contro le sovracorrenti e inferiore a 1 secondo quando si usano dispositivi di protezione differenziale.

Nel sistema IT nessun punto dell'impianto deve essere collegato direttamente a terra, ma bensì dev'essere isolato o collegato a terra per mezzo di un'impedenza sufficientemente elevata, come in Fig. 10.4.

Tutte le masse devono essere messe a terra individualmente o a gruppi.

³⁴ Fonte: CEI EN 50272-2, Fig. 2, pag. 10

³⁵ Fonte: CEI EN 50272-2, Fig. 1, pag. 9

³⁶ Fonte: CEI EN 50272-2, Fig. 3, pag. 11

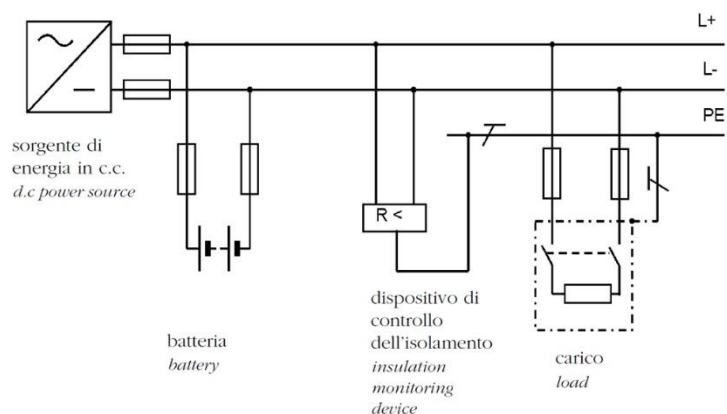


Fig. 10.4 - Sistema IT³⁷

La protezione attraverso sconnessione non è richiesta al primo guasto, mentre se è disponibile un dispositivo di controllo dell'isolamento deve essere attivato un segnale visivo o sonoro.

L'intervento è necessario in caso di secondo guasto, in quanto potrebbe verificarsi una situazione potenzialmente pericolosa.

Devono essere forniti per qualsiasi tipologia di sistema dei dispositivi che permettano di scollegare il pacco batterie da tutte le linee di ingresso e di uscita e dal conduttore di terra.

Tale prescrizione può essere soddisfatta in particolar modo attraverso l'uso di interruttori, elementi di connessione o fusibili asportabili.

10.2 Protezione contro i cortocircuiti

In caso di cortocircuito del pacco batterie si può verificare un elevato flusso di corrente non interrompibile, con conseguente aumento incontrollato della temperatura e rischio di vaporizzazione dell'elettrolito, rilascio di metallo fuso e pericolo di esplosione.

Per questo motivo i morsetti della batteria devono sopportare le forze elettromagnetiche previste durante un cortocircuito.

Raccomandazione da non trascurare è quella che riguarda la pulizia dell'accumulatore e le influenze ambientali che potrebbero portare all'incendio o alla corrosione della batteria.

A tal scopo la resistenza di isolamento minima tra la batteria e le altre masse adiacenti deve essere di almeno 100Ω per volt, corrispondente ad una corrente di fuga inferiore a 10 mA.

10.3 Protezione contro i pericoli di esplosione

Le batterie durante la ricarica, la carica di mantenimento e la sovraccarica possono produrre ed emettere gas a causa del processo di elettrolisi dell'acqua.

Quando la concentrazione di idrogeno nell'aria supera il 4% in volume si può generare una situazione ad elevato rischio esplosivo.

³⁷ Fonte: CEI EN 50272-2, Fig. 4, pag. 12

Per questo motivo è buona norma prevedere la ventilazione naturale o forzata dei locali, con una portata d'aria minima di $Q = 0,05 \cdot n \cdot I_{\text{gas}} \cdot C_{\text{rt}} \cdot 10^{-3} \left[\frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right]$, dove n è il numero di elementi, I_{gas} è la corrente che produce gas espressa in mA per Ah di capacità assegnata e C_{rt} è la capacità C10.

Per ottenere una corretta ventilazione naturale le aperture di ingresso e uscita dell'aria devono essere di almeno $A = 28 \cdot Q \text{ [cm}^2\text{]}$, mentre in ventilazione forzata è il caricabatterie che determina il flusso d'aria necessario.

In prossimità delle batterie non sempre è assicurata la corretta diluizione di gas esplosivi, perciò è vietato utilizzare dispositivi incandescenti o che emettono scintille ad una distanza inferiore a $d = 28,8 \cdot \sqrt[3]{I_{\text{gas}}} \cdot \sqrt[3]{C_{\text{rt}}} \text{ [mm]}$.

10.4 Sommario

Emerge dall'analisi della norma la necessità fondamentale di installare il sistema di accumulo in un locale batterie adeguatamente ventilato per scongiurare il rischio esplosione correlato alla formazione di gas durante particolari condizioni di funzionamento delle batterie.

Vengono aggiunte anche ulteriori prescrizioni sulla sicurezza elettrica legata al luogo di installazione e alla tipologia di rete presente presso il cliente finale, prevedendo barriere o ostacoli in determinate condizioni operative dell'accumulatore.

Questo permette di identificare il luogo idoneo per l'installazione del sistema di accumulo, aspetto che viene sottovalutato ma che risulta di rilevante importanza per la salvaguardia della sicurezza.

11. CONCLUSIONI

In questo elaborato sono state analizzate tutte le norme attualmente disponibili che regolarizzano i singoli componenti e le possibili applicazioni dei sistemi di accumulo di energia prodotta da fonti rinnovabili.

Si è altresì dato spazio ai principali aspetti tecnici e costruttivi legati alle migliori tecnologie, ponendo particolare attenzione alla sicurezza elettrica ed esaminando talvolta soluzioni applicabili anche a prodotti totalmente diversi.

Ne è emerso un quadro piuttosto chiaro a livello di norme di prodotto, rimanendo però slegato nel suo insieme a causa della pesante mancanza di una norma specifica che convalida l'idoneità di tale sistema connesso alla rete pubblica.

Questo fatto, congiuntamente con l'attuale situazione economica e il costo delle batterie, ha penalizzato la crescita del mercato in quanto gli impianti connessi in rete ricoprono quasi la totalità dei casi possibili.

Tuttavia entro l'anno corrente, il 2014, dovrebbe essere pubblicata una nuova norma che andrà a colmare il vuoto normativo, pertanto per gli anni a seguire è previsto un rapido incremento della domanda e conseguentemente dell'offerta per questa tipologia di prodotti.

BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

Batterie

CEI EN 60896-11 - “Batterie di accumulatori stazionari al piombo - Parte 11: Batterie del tipo aperto - Prescrizioni generali e metodi di prova”, 2004-01, ed. quarta.

CEI EN 60896-21 - “Batterie di accumulatori stazionari al piombo - Parte 21: Tipi regolate con valvole - Metodi di prova”, 2005-09, ed. prima.

CEI EN 60896-22 - “Batterie di accumulatori stazionari al piombo - Parte 22: Tipi regolate con valvole - Prescrizioni”, 2005-09, ed. prima.

CEI EN 60086-4 - “Pile elettriche - Parte 4: Sicurezza delle pile al litio”, 2009-01, ed. terza.

CEI EN 61427 - “Elementi e batterie di accumulatori per sistemi fotovoltaici (PVES) - Prescrizioni generali e metodi di prova”, 2006-05, ed. seconda.

A. Jossen, J. Garche, D.U. Sauer, 2004, “Operation conditions of batteries in PV applications”, *Solar Energy*, vol. 76, n. 6, pp 759-769.

E.M. Krieger, J. Cannarella, C.B. Arnold, 2013, “A comparison of lead-acid and lithium-based battery behavior and capacity fade in off-grid renewable charging applications”, *Energy*, vol. 60, pp. 492-500.

G. Albright, J. Edie, S. Al-Hallaj, 2012, “A compariso of lead-acid to lithium-ion in stationary storage applications”, *AltEnergy eMagazine*.

J.L. Sudworth, R.C. Galloway, 2009, “SECONDARY BATTERIES - HIGH TEMPERATURE SYSTEM | Sodium-Nickel Chloride”, *Encyclopedia of Electrochemical Power Sources*, pp. 312-323.

Trojan Battery Company, <http://www.trojanbatteryre.com>, Ottobre 2013.

Cadex Electronics Inc., <http://www.batteryuniversity.com>, Ottobre 2013.

BMS

R. Kaiser, 2007, “Optimized battery-management system to improve storage lifetime in renewable energy system”, *Journal of Power Sources*, vol. 168, n. 1, pp. 58-65.

A. Jossen, V. Späth, H. Döring, J. Garche, 1999, “Reliable battery operation - a challenge for the battery management system”, *Journal of Power Sources*, vol. 84, n. 2, pp. 283-286.

Regolatore di carica

CEI EN 62509 - “Prestazioni e funzionamento di regolatori di carica per impianti fotovoltaici”, 2012-01, ed. prima.

Y. Li, X. Yan, G. Chen, 2012, “Design of Intelligent Accumulator Charger for wind power Generation System”, *Energy Procedia*, vol. 17, n. A, pp. 825-833.

C. Wang, W. Chen, S. Shao, Z. Chen, B. Zhu, H. Li, 2011, “Energy Management of Stand-Along Hybrid PV System”, *Energy Procedia*, vol. 12, pp. 471-479.

T.L. Gibson, N.A. Kelly, 2010, “Solar photovoltaic charging of lithium-ion batteries”, *Journal of Power Sources*, vol. 195, n. 12, pp. 3928-3932.

Steca Elektronik GmbH, http://www.steca.com/index.php?Elettronica_solare_home, Novembre 2013

Victron Energy bv, <http://www.victronenergy.it>, Novembre 2013.

Convertitore di potenza

CEI EN 62109-1 - “Sicurezza degli apparati di conversione di potenza utilizzati in impianti fotovoltaici di potenza - Parte 1: Prescrizioni generali”, 2010-12, ed. prima.

CEI EN 60950-1 - “Apparecchiature per la tecnologia dell’informazione”, 2007-02, ed. sesta.

Altro

CEI EN 62040-1 - “Sistemi statici di continuità (UPS) - Parte 1: Prescrizioni generali e di sicurezza”, 2009-05, ed. prima.

CEI EN 50272-2 - “Prescrizioni di sicurezza per batterie di accumulatori e loro installazioni - Parte 2: Batterie stazionarie”, 2002-08, ed. prima.

H. Chen, T.N. Cong, W. Yang, C. Tan, Y. Li, Y. Ding, 2009, “Progress in electrical energy storage system: A critical review”, Progress in Natural Science, vol. 19, n. 3, pp. 291-312.

O.M. Toledo, D.O. Filho, A.S.A.C. Diniz, 2010, “Distributed photovoltaic generation and energy storage system: A review”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 14, n. 1, pp. 506-511.