



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Ingegneria Industriale DII

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria dell'Energia Elettrica

LIMITATORI DI SOVRATENSIONI

Relatore

Prof. Renato Gobbo

Damiano Tessari 1231778

Anno Accademico 2021/2022

SOMMARIO

Quando si parla di impianti elettrici, il primo tema da cui partire è la sicurezza, sia delle persone, che possono eventualmente venire a contatto con parti di esso, sia degli oggetti che ne fanno parte. In questo ambito sono stati progettati dei dispositivi ad hoc, i limitatori o scaricatori delle sovratensioni che, insieme ad altri componenti essenziali, quali interruttori, fusibili e quant'altro, hanno il compito di garantire l'incolumità di tutto il sistema in caso di possibili guasti all'interno della rete. L'azione principale di un limitatore è quella di devolvere verso terra l'energia in eccesso che può derivare da una scarica atmosferica o da manovre elettriche in rete. Il problema delle sovratensioni non riguarda solo l'ambito industriale, delle grandi centrali fotovoltaiche o delle lunghissime linee in alta tensione che trasportano l'elettricità in tutto il paese, ma colpiscono anche il semplice impianto domestico di bassa tensione. È diventata infatti sempre più frequente l'abitudine di installare anche nei quadri elettrici delle abitazioni questi apparecchi atti alla loro protezione. Per questo motivo, e vista la sempre maggiore esigenza di rendere il più sicuri possibile i nuovi impianti ancor più vasti e complessi, il lavoro di questa tesi andrà a evidenziare le principali caratteristiche di un limitatore di sovratensione, dal principio di funzionamento fino ai criteri di connessione con l'impianto, mettendo in evidenza le differenze che intercorrono tra i diversi tipi in commercio, dando infine uno sguardo pratico al modo di intervento di diversi componenti attraverso una prova nel laboratorio dell'Università degli studi di Padova. All'interno di questo elaborato è stato inoltre affrontato il tema degli scaricatori per i sistemi di potenza in alta tensione, volgendo uno sguardo generale ai loro principi operativi e alla loro configurazione, citando delle sperimentazioni che hanno lo scopo di migliorarne la stabilità e l'affidabilità.

Il fine di questa tesi è quello di sensibilizzare il lettore su questo tema molto attuale, creando un'ulteriore base di partenza per intraprendere il percorso di progettista di impianti elettrici.

INDICE

1. Introduzione	7
1.1. Origine delle sovratensioni	7
1.2. Analisi del rischio	8
1.3. Funzionamento generale di un SPD (Surge Protective Device)	8
2. Generalità sugli scaricatori di tensione	11
2.1. Forme d'onda di prova	11
2.2. Tecnologie impiegate	12
2.3. Classi degli scaricatori	13
2.4. Grandezze rilevanti	14
2.5. Sistemi di messa a terra	14
2.6. Modi di protezione	17
2.7. Schema generale di un impianto	17
3. Regole di installazione	19
3.1. Criteri preliminari	19
3.2. Protezione di backup	19
3.3. Distanza di protezione e coordinamento	20
3.4. Cablaggio e installazione in un quadro elettrico	21
4. Confronto con interruttore automatico	25
5. Protezione di impianti fotovoltaici	29
5.1. Impianto fotovoltaico su un edificio dotato di protezione contro i fulmini esterna..	32
5.2. Protezione contro fulmini e sovratensioni per impianti fotovoltaici a terra	34
6. Scaricatori per linee dati e sistemi di telecomunicazione	41
6.1. Protezioni per reti ethernet e fast ethernet	44
6.2. Protezione da sovratensioni per M-bus	48

6.3. Protezione da sovratensione per utenze di telecomunicazione	50
7. Scaricatori in ossido metallico per sistemi di potenza in alta tensione	53
7.1. Principi operativi	53
7.2. Progettazione degli scaricatori in ossido metallico	56
7.3. Configurazione degli scaricatori in ossido metallico	59
8. Una nuova tecnica per il monitoraggio basata sulla corrente resistiva di quinta armonica	69
9. Varistore in ossido di zinco con drogaggio di boro e sodio per aumentare la stabilità all'impulso di corrente	75
10. Normativa - Requisiti e metodi di prova per SPD connessi a reti di bassa tensione	83
11. Test eseguito in laboratorio	99
12. Conclusioni	109
Bibliografia	111

1. INTRODUZIONE

1.1 ORIGINE DELLE SOVRATENSIONI

La maggior parte dei dispositivi utilizzati in tutti i settori, da quello residenziale fino a quello industriale, sono di tipo elettrico o elettronico; quando questi sono sollecitati da sovratensioni possono verificarsi delle situazioni di guasto dei dispositivi stessi o quantomeno di interruzione della loro attività. Le sovratensioni più pericolose derivano dalle fulminazioni (sovratensioni di origine esterna) o da manovre elettriche della rete, quali chiusura e apertura di interruttori e sezionatori (sovratensioni di origine interna). Le scariche atmosferiche rilasciano una potenza che può raggiungere diverse centinaia di gigawatt con effetti dannosi che possono arrivare a distanze di molti chilometri dal punto di contatto con l'impianto elettrico. Gli effetti delle fulminazioni possono essere diversi a seconda che esse siano di tipo diretto o indiretto, e dipendono da quale parte dell'impianto viene colpito. Quando viene colpito un parafulmine o il tetto di un edificio dotato di impianto di messa a terra, la corrente viene dispersa a terra mediante il conduttore di protezione di terra (PE) che risente di un notevole aumento di tensione a causa della sua impedenza, per effetto ohmico. Le apparecchiature elettriche collegate al sistema possono perdere il loro isolamento e da ciò ne consegue la circolazione di parte della corrente del fulmine che porta al danneggiamento. Se il fulmine colpisce una linea aerea di bassa tensione, essa viene percorsa da correnti di elevata intensità che portano a delle sovratensioni all'interno dell'edificio, con conseguenze disastrose per le apparecchiature elettroniche collegate alla rete. Quando il fulmine colpisce un punto che si trova nelle vicinanze di un impianto elettrico, si genera un campo elettromagnetico che produce delle sovratensioni nell'impianto stesso (accoppiamento di tipo induttivo); nel caso di fulminazione indiretta i danni possono essere più lievi, ma comunque sufficienti a danneggiare completamente gli apparecchi elettronici più sensibili.



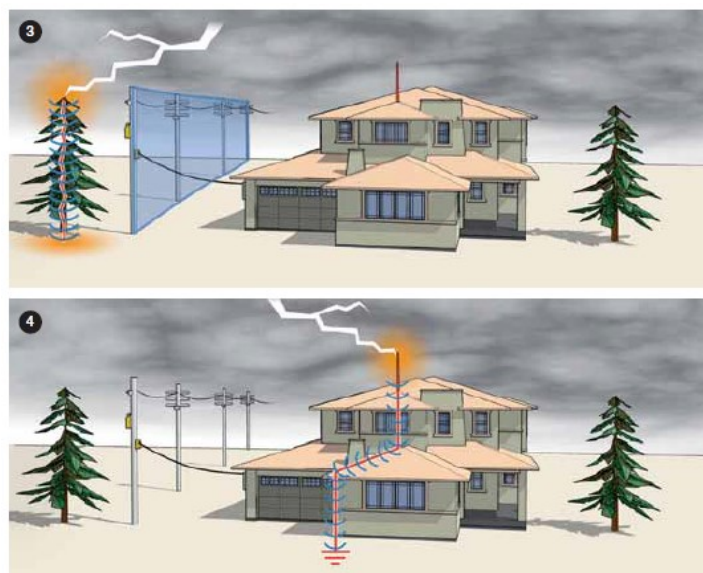


Fig. 1.1 - Diversi tipi di fulminazione: 1) Diretta sul sistema di protezione esterno (parafulmine). 2) Diretta sulla linea aerea. 3) Indiretta: fulminazione di un albero nelle vicinanze. 4) Indiretta: effetti del passaggio di corrente nel conduttore di protezione.

1.2 ANALISI DEL RISCHIO

Il primo passo da compiere per la protezione dell'impianto è l'analisi del rischio. Esiste una normativa internazionale IEC 62305 che fornisce tutti gli elementi per la valutazione del rischio a cui è soggetto un qualunque tipo di edificio, delle persone al suo interno e dei servizi a esso connessi, e per la selezione delle misure idonee alla protezione dello stesso. Esistono quattro tipi diversi di perdite che una struttura può subire: perdita di vite umane, di servizi pubblici essenziali, di patrimonio culturale insostituibile e di valore puramente economico. Mentre per i primi tre tipi di perdita esiste un valore limite di rischio oltre il quale è prevista una protezione obbligatoria nell'impianto, per la perdita di tipo economico la protezione è sempre facoltativa (si tratta di un confronto tra costi e benefici). In breve, una volta studiate le varie sorgenti di danno e i loro relativi effetti, se il rischio di perdite risulta essere minore del massimo rischio accettabile allora la protezione è facoltativa, se il rischio è invece maggiore del massimo rischio accettabile allora l'inserimento della protezione è obbligatorio, per ridurre i pericoli nell'impianto.

1.3 FUNZIONAMENTO GENERALE DI UN SPD (SURGE PROTECTIVE DEVICE)

Gli scaricatori di tensione sono dispositivi progettati per salvaguardare i sistemi e le apparecchiature elettriche contro le sovratensioni transitorie e impulsive. Le sovratensioni transitorie consistono in un picco di tensione di breve durata con intensità tale da distruggere i dispositivi che investono. Gli scaricatori hanno la funzione di deviare la corrente di scarica

impulsiva e limitare la sovratensione nelle apparecchiature che devono proteggere. Durante il funzionamento normale essi agiscono come un circuito aperto e mantengono l'isolamento tra i conduttori attivi e la terra; quando si verifica una sovratensione essi agiscono come un circuito chiuso, riducendo in modo quasi istantaneo la loro impedenza interna, e deviano la corrente, limitando dunque l'innalzamento di tensione nell'apparecchiatura a valle; al termine della sovratensione impulsiva la loro impedenza ritorna allo stato originario.



Fig. 1.2 – Effetto di una sovratensione da 6 kV in assenza di protezione: il dispositivo viene distrutto.

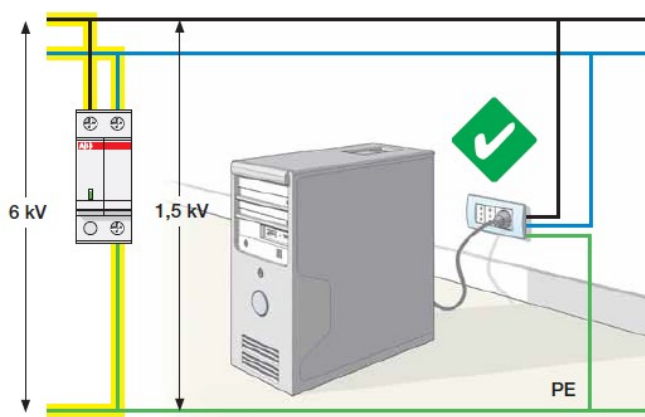


Fig. 1.3 – Grazie allo scaricatore la corrente di scarica viene deviata verso terra, ai capi del dispositivo c'è una tensione più bassa mantenendone l'integrità.

2. GENERALITÀ SUGLI SCARICATORI DI TENSIONE

2.1 FORME D'ONDA DI PROVA

Un fulmine può essere considerato come un generatore di corrente ideale che inietta in rete un'onda di corrente con valore di picco molto elevato. Sulla base di molti anni di ricerche e misurazioni di questo fenomeno le Norme hanno introdotto due forme d'onda atte a rappresentare l'andamento di corrente in caso di fulminazione diretta o indiretta, o dovuto a manovre elettriche sulla rete.

La prima forma d'onda è la 10/350 μs , dove il primo numero rappresenta il tempo, in microsecondi, che impiega il valore di corrente a passare dal 10% al 90% del valore massimo, ossia la durata del fronte di salita, mentre il secondo numero rappresenta la durata all'emivalore, cioè il tempo che impiega il valore di corrente a tornare al 50% nel fronte di discesa dell'onda. Questa forma d'onda simula l'effetto di una fulminazione diretta, che comporta un aumento repentino e intenso della corrente associato ad una scarica elevata di energia elettrica.

La seconda forma d'onda è la 8/20 μs ed è associata agli effetti di una fulminazione indiretta o di una manovra elettrica. Essa comporta una scarica di energia di valore inferiore rispetto alla prima, infatti l'energia può essere calcolata come integrale nel tempo dell'onda di corrente elevata al quadrato, quindi è evidente che un'onda più breve abbia un risultato minore.

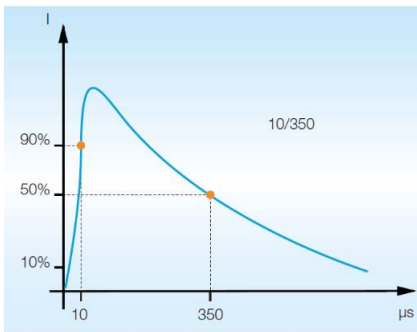


Fig. 2.1 – Forma d'onda 10/350 μs .

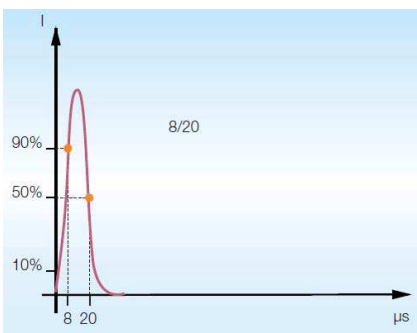


Fig. 2.2 – Forma d'onda 8/20 μs .

In verità la maggior parte dei fulmini presenta scariche secondarie, che seguono quella iniziale a $30\div 200$ millisecondi di ritardo l'una dall'altra. Mediamente tre scariche seguono quella principale, ma in alcuni casi sono state registrate fino a 20 scariche in rapida successione. Ma poiché la componente prevalente di energia viene rilasciata nella prima fase, essa comporta la maggior sollecitazione sul dispositivo di protezione, quindi sia per la progettazione, sia per la scelta degli SPD, viene presa in considerazione soltanto la prima scarica.

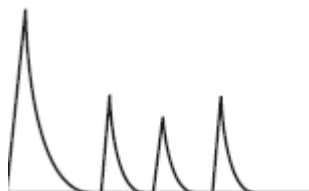


Fig. 2.3 – Rappresentazione qualitativa di una fulminazione: Dopo una prima scarica ne seguono altre di minore intensità.

2.2 TECNOLOGIE IMPIEGATE

Esistono sostanzialmente due tipologie di scaricatori, entrambe contengono almeno un componente non lineare e la loro resistenza elettrica varia in funzione della tensione cui è sottoposto.

La prima tecnologia si basa sugli spinterometri, ossia due elettrodi vicini che isolano una parte del circuito dall'altra fino ad un certo valore di tensione. Durante il funzionamento normale lo spinterometro non conduce corrente tra gli elettrodi, quando si verifica una sovratensione l'impedenza interna scende molto rapidamente con conseguente formazione di un arco elettrico, il quale viene spento al termine della sovratensione. L'innesco dell'arco elettrico può essere anticipato da un dispositivo elettronico, in modo da evitare valori di tensione troppo elevati e proteggere in modo più sicuro i dispositivi a valle. L'arco elettrico viene poi interrotto nel minor tempo possibile all'interno di una camera di estinzione.

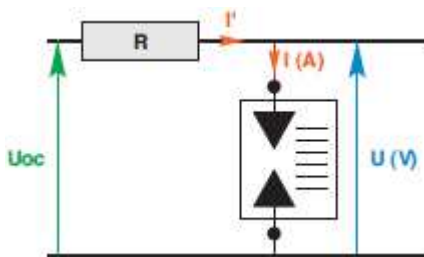


Fig. 2.4 – Schema circuitale di uno scaricatore basato su spinterometri.

La seconda tecnologia si basa su varistori, componenti con impedenza interna che varia in funzione della tensione applicata su di essi. Sono caratterizzati da una impedenza elevata in caso di funzionamento normale, ma quando si verifica una sovratensione l'impedenza cala repentinamente al di sotto di $1\ \Omega$, permettendo alla corrente di scorrere attraverso di loro.

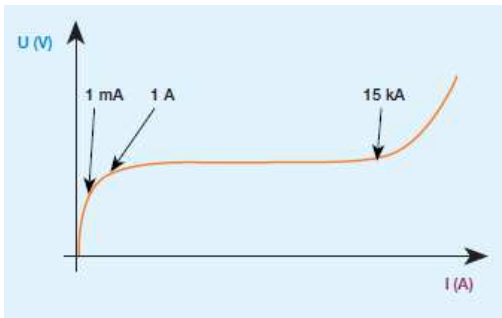


Fig. 2.5 – Caratteristica di tensione in funzione della corrente per un varistore.

Entrambe le tecnologie presentano vantaggi o svantaggi l'una rispetto all'altra, un varistore per esempio è sempre percorso da una minima corrente continuativa, che può crescere con l'usura del componente, ma ha il vantaggio di essere caratterizzato da tempi di risposta molto rapidi e non necessita di una camera di estinzione. Uno spinterometro, invece, a riposo garantisce che non ci sia nessuna circolazione di corrente e sono caratterizzati da una resistenza di conduzione pressoché nulla, di contro necessitano di un dispositivo elettronico per velocizzare il tempo di risposta e di una protezione di backup per interrompere l'arco elettrico quando la corrente di cortocircuito nel punto di installazione raggiunge valori superiori alla prestazione di interruzione dello scaricatore stesso. Per questo motivo talvolta si ricorre a scaricatori a tecnologia combinata per ottimizzarne le prestazioni.

2.3 CLASSI DEGLI SCARICATORI

Ci sono due diverse classi di scaricatori per impianti elettrici di bassa tensione, a seconda dell'impiego cui sono sottoposti. La Classe 1 (o Tipo 1) è testata con una forma d'onda 10/350 μ s, serve a proteggere l'impianto da fulminazione diretta, per esempio su un parafulmine o una linea aerea, viene installata all'origine dell'impianto e solitamente è uno scaricatore formato da spinterometri. La Classe 2 (o Tipo 2) è invece testata con forma d'onda 8/20 μ s, ha il fine di proteggere dalle sovratensioni indotte originate per fulminazione indiretta, viene installata su ogni quadro dell'impianto in prossimità delle apparecchiature delicate e solitamente è di tipo a varistori.

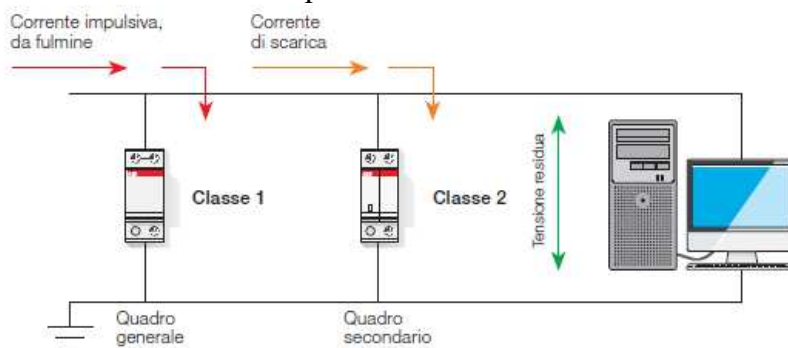


Fig. 2.6 – Esempio di impianto con protezione di Classe 1 e Classe 2.

Esistono anche degli scaricatori di Classe 1 e Classe 2 che combinano le caratteristiche di entrambi, servono a proteggere sia da fulminazione diretta che indiretta, sono solitamente a tecnologia combinata di varistore e spinterometro e vengono installati all'origine dell'impianto con un'occupazione ridotta di spazio, in prossimità delle apparecchiature delicate.

2.4 GRANDEZZE RILEVANTI

Di seguito sono riportate le definizioni delle grandezze che caratterizzano il funzionamento di uno scaricatore di sovratensione, così come vengono citate in Normativa EN 61643-11 (*Low-voltage surge protective devices: Surge protective devices connected to low-voltage power systems - Requirements and test methods*)

I_{imp} : corrente impulsiva per la classe di prova I: Valore di picco della corrente di scarica con forma d'onda da 10/350 μs che l'apparecchio è in grado di scaricare verso terra almeno 20 volte consecutive senza deteriorarsi.

I_n : corrente di scarica nominale per la Classe di prova II: Valore di picco della corrente di scarica con forma d'onda da 8/20 μs che l'SPD di Classe 2 è in grado di scaricare almeno 20 volte consecutive senza deteriorarsi.

I_{max} : corrente di scarica massima per la classe di prova II: Valore di picco della corrente massima di scarica con forma d'onda da 8/20 μs che un SPD di Classe 2 è in grado di tollerare almeno una volta.

U_n : tensione nominale: Tensione nominale in valore efficace della rete in corrente alternata tra fase e neutro.

U_c : tensione massima continuativa (IEC 61643-1): Tensione massima verso terra che lo scaricatore è in grado di sopportare permanentemente senza intervenire né deteriorarsi.

U_p : livello di protezione in tensione: Caratterizza la capacità dello scaricatore di limitare la tensione tra i suoi morsetti in presenza di una sovratensione impulsiva.

U_w : tenuta all'impulso delle apparecchiature: Tensione oltre la quale un dispositivo rischia un grave danneggiamento (U_p deve essere sempre minore di U_w).

2.5 SISTEMI DI MESSA A TERRA

Esistono quattro tipi di collegamenti per la messa a terra, in base alla connessione del neutro a terra e alla connessione delle parti conduttive esposte (masse) alla terra o al neutro.

TT – Neutro collegato a terra e masse collegate ad un collettore di terra.

TN-C – Neutro collegato a terra e masse collegate al neutro.

TN-S – Neutro collegato a terra e masse collegate al conduttore di protezione.

IT – Neutro isolato o collegato a terra tramite impedenza e masse collegate ad un collettore di terra.

La scelta del sistema di messa a terra dipende dalle condizioni operative (per esempio se la continuità del servizio è prioritaria o meno) e dalle esigenze e modalità di manutenzione cui deve essere sottoposto l'impianto da proteggere.

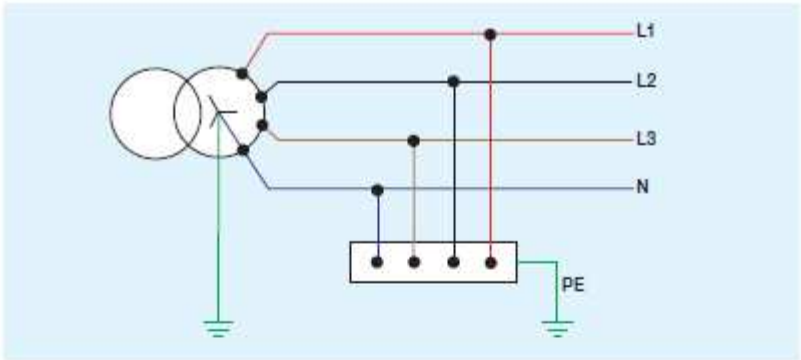


Fig. 2.7 – Sistema TT.

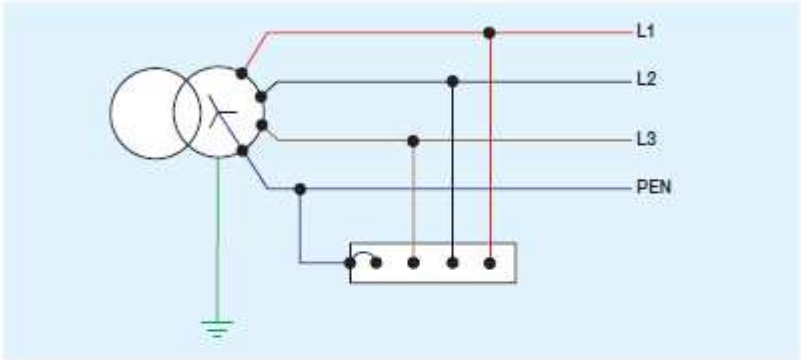


Fig. 2.8 – Sistema TN-C.

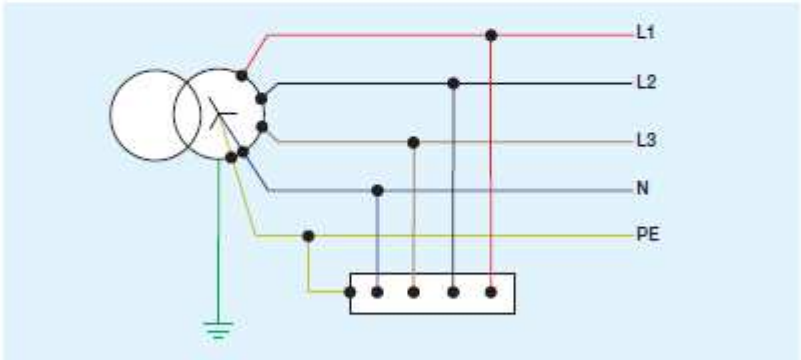


Fig. 2.9 – Sistema TN-S.

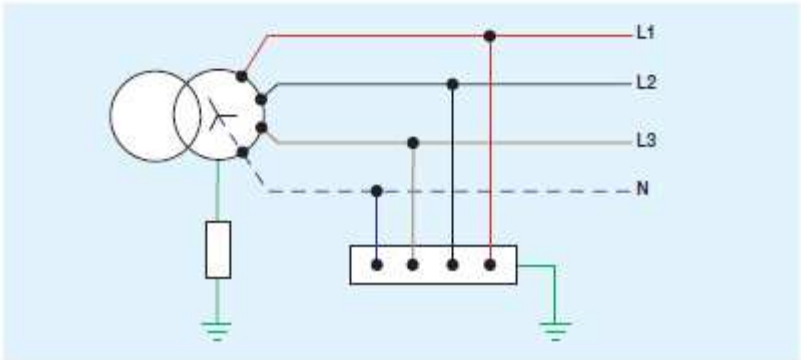


Fig- 2.10 – Sistema IT.

2.6 MODI DI PROTEZIONE

Le sovratensioni negli impianti possono essere di modo comune, ossia tra conduttori attivi e terra (fase/terra o neutro/terra), o di modo differenziale ossia tra conduttori attivi (fase/fase o fase/neutro), oppure una combinazione dei due. Per garantire la massima sicurezza è buona norma installare delle protezioni che consentano la combinazione delle due tipologie di sovratensioni.

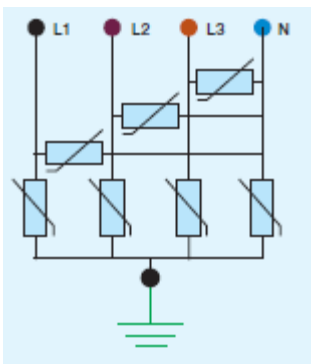


Fig. 2.11 – Esempio di protezione di modo comune e differenziale.

2.7 SCHEMA GENERALE DI UN IMPIANTO

Per la protezione globale di un impianto o di un edificio, con eventuale presenza di parafulmine, è necessaria innanzi tutto la presenza di uno scaricatore di Classe 1 per proteggere dalle fulminazioni dirette, questo viene montato nel quadro generale all'ingresso dell'impianto e definisce il primo livello di protezione contro le sovratensioni in rete ed ha un'efficacia rilevante ad una distanza di 10 metri. Pertanto è necessaria anche la presenza di uno scaricatore di Classe 2 a valle per la protezione delle apparecchiature terminali, questo viene coordinato con la protezione a monte e ha la funzione di limitare gli effetti di fulminazione indiretta. Infine può esserci uno scaricatore aggiuntivo atto a proteggere le linee telefoniche o di trasmissione dati, che necessitano di un controllo più specifico, poiché lavorano generalmente a tensioni molto inferiori rispetto alla rete elettrica di alimentazione. Questo è uno scaricatore di sovratensione di Classe 3, provato con un generatore di onda combinata 1,2/50 - 8/20 μ s, che assicura un livello di protezione molto basso.

È bene ricordare che anche qualora la protezione non fosse indispensabile, al seguito della valutazione dei rischi dovuti alle fulminazioni, considerando che il rischio zero non esiste, è buona norma prevedere sempre un mezzo di protezione. Ad ogni modo, dove è raccomandata la protezione contro i fulmini, è sufficiente selezionare il prodotto appropriato ed installarlo, sulla base di diversi elementi quali la tipologia di fulminazione (diretta o indiretta), il livello di protezione (U_p), la capacità di scarica (massima corrente gestibile dal sistema), la modalità di messa a terra della rete, le tensioni di esercizio, le opzioni e gli accessori a disposizione dell'apparecchiatura (indicatore di fine vita, cartucce estraibili, riserva di sicurezza e segnalazione a distanza). È importante anche la valutazione dei criteri ambientali, ossia

l'ubicazione dell'impianto e la conformazione del territorio circostante, oltre alla presenza o meno di parafulmine o elementi elettrici nelle vicinanze. Infine esistono altri criteri di selezione quali la priorità alla continuità del servizio (per esempio è molto importante mantenere operativo un edificio ospedaliero, per ovvie ragioni), il valore economico delle apparecchiature da proteggere e la frequenza di fulminazione nella regione.

3. REGOLE DI INSTALLAZIONE

3.1 CRITERI PRELIMINARI

Per limitare le sovratensioni è opportuno seguire alcuni accorgimenti, ossia evitare maglie che racchiudano un'area molto grande, accertarsi che la posizione degli elementi che creano sovratensioni (per esempio i parafulmini) sia ad una distanza sufficiente dalle apparecchiature sensibili, prediligere l'uso di schermi per le apparecchiature ed i cavi, provvedere a realizzare un collegamento equipotenziale per le parti metalliche che interessano l'edificio, prediligere interruttori differenziali selettivi per evitare aperture inopportune dei circuiti.

3.2 PROTEZIONE DI BACKUP

In molti casi può essere necessaria una protezione aggiuntiva, detta di "backup", un interruttore automatico o un fusibile, che ha la funzione di aprire il circuito in caso di guasto o in presenza di un corto circuito al seguito della scarica, che l'SPD non è in grado di aprire.

In uno scaricatore di Classe 1, dopo che si è formato un arco elettrico tra gli elettrodi dello spinterometro, esso viene interrotto nella camera di estinzione. Ma se il valore di corrente dell'arco è troppo elevato è possibile che esso non venga interrotto tempestivamente con conseguente produzione di calore nell'impianto e creazione di un rischio di incendio. A questo punto deve intervenire la protezione di backup.

In uno scaricatore di Classe 2, che solitamente contiene varistori, dopo un certo tempo di esercizio è possibile che un varistore si deteriori riducendo la sua caratteristica di isolamento. A fine vita la corrente che fluisce nel circuito può essere tanto elevata da portare a surriscaldamenti e danni. Per prevenire ciò è installato un disconnettore termico integrato su ciascun varistore che serve a scollegarlo dalla rete. Se però si genera un corto circuito nell'impianto il disconnettore termico può non essere in grado di aprire il circuito e questa operazione deve essere svolta dal fusibile di backup.

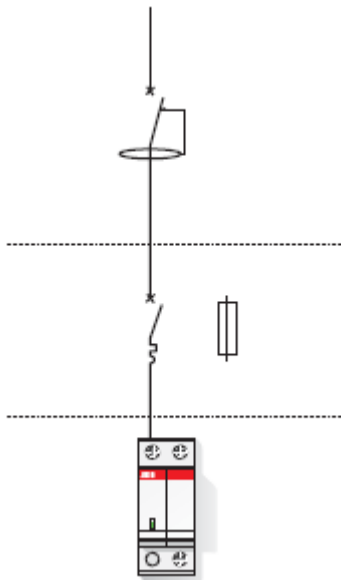


Fig. 3.1 – Rappresentazione schematica: A monte è presente un interruttore differenziale per protezione contro i contatti indiretti, poi è presente il dispositivo di interruzione di backup che ha la funzione di proteggere da guasti o dal fine vita del sistema, infine è presente lo scaricatore di sovratensione vero e proprio che è dotato di un disconnettore termico integrato.

Le protezioni di backup forniscono la massima continuità di servizio e la massima sicurezza, poiché l'interruttore non scatta durante il passaggio di ogni singola scarica ma solo nel momento in cui lo scaricatore arrivi a fine vita o il disconnettore termico non sia in grado di aprire il circuito.

3.3 DISTANZA DI PROTEZIONE E COORDINAMENTO

Bisogna porre notevole attenzione alla distanza che intercorre tra il punto in cui è effettivamente installato lo scaricatore e l'apparecchio che deve proteggere, infatti all'aumentare di tale distanza l'efficacia del sistema di protezione diminuisce, a causa di fenomeni di riflessione e di tipo oscillatorio nel cavo che portano ad una sovratensione (fino a due volte U_p) o a fenomeni di induzione magnetica. La distanza protetta, ossia la massima lunghezza del conduttore, è legata al livello di protezione dell'SPD e dal livello di tenuta all'impulso dell'apparecchio da proteggere. Dai dati sperimentali risulta che tale distanza non deve mai superare i 10 metri, quindi è talvolta possibile che la sola protezione all'origine dell'impianto non sia sufficiente, ma che siano necessari ulteriori SPD a valle con livello di protezione inferiore e coordinati con quello a monte. In definitiva, se la lunghezza della linea tra SPD e apparecchiatura è inferiore a 10 m, la protezione viene considerata efficace al 100%, altrimenti l'efficacia diminuisce: la Norma IEC 61643-12 stabilisce che la protezione a monte deve essere ripetuta a valle se:

$$U_p \cdot 2 > 0,8 \cdot U_w$$

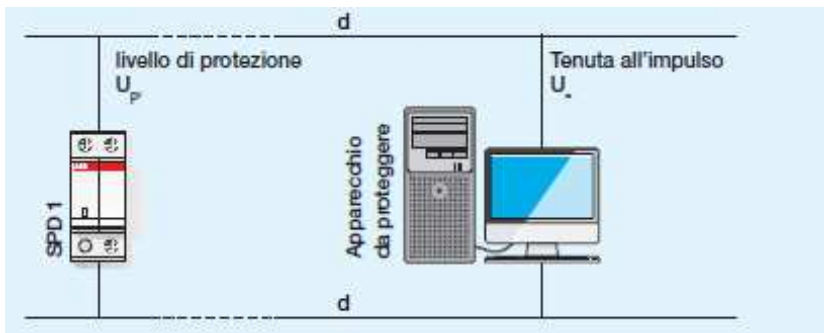


Fig. 3.2 – Schema di un impianto, d rappresenta la distanza di protezione tra SPD e apparecchio, che è minore di 10 m.

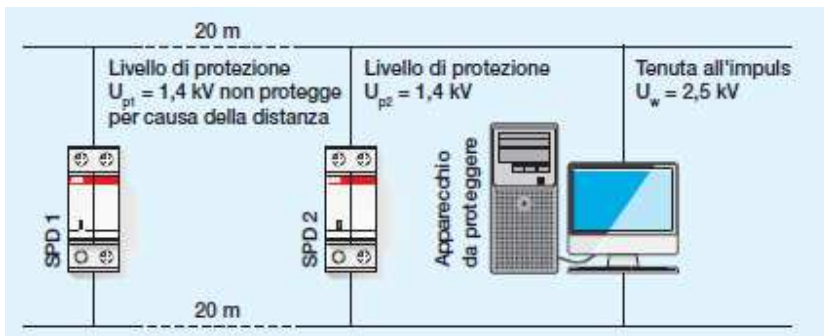


Fig. 3.3 – In questo caso la distanza è superiore a 10 m e poiché il livello di protezione del primo SPD non rispetta le caratteristiche per proteggere il dispositivo a valle è richiesto un ulteriore SPD più vicino.

3.4 CABLAGGIO E INSTALLAZIONE IN UN QUADRO ELETTRICO

Per definire la distanza di collegamento dei morsetti dello scaricatore ci si riferisce alla “Regola dei 50 cm”: Un’apparecchiatura protetta da SPD è soggetta ad una tensione U_{prot} pari alla somma del livello di protezione dello scaricatore U_p , della tensione ai capi della protezione di backup U_d e delle tensioni nei collegamenti U_1, U_2, U_3 . Per mantenere il livello di protezione al di sotto della tenuta all’impulso U_w dei dispositivi da proteggere, la lunghezza totale L dei cavi di collegamento deve essere la più breve possibile (sempre minore di 0,50 m).

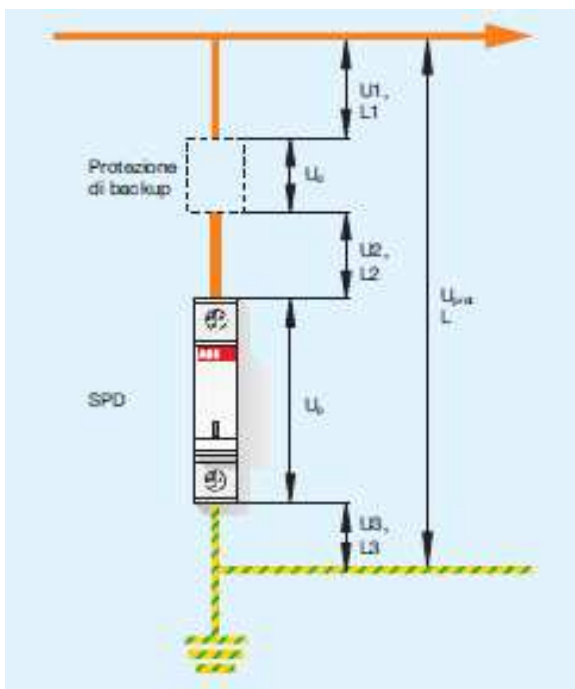


Fig. 3.4 – Rappresentazione schematica delle distanze dei collegamenti, L_1 rappresenta la distanza tra il conduttore attivo e la protezione di backup, L_2 quella tra la protezione di backup e l'SPD, L_3 quella tra l'SPD e il potenziale di terra. Il dispositivo da proteggere deve essere collegato ai capi di U_{prot} .

Nel caso in cui la lunghezza di collegamento L sia superiore a 0,50 m si raccomanda di adottare uno dei seguenti accorgimenti:

- 1) Ridurre la lunghezza totale spostando il punto di installazione dell'SPD, oppure utilizzando la tecnica di cablaggio a V (o "entra-esci"), o, nei quadri di grandi dimensioni, riferendo il cavo di protezione PE entrante su una barretta di terra in prossimità dello scaricatore.
- 2) Scegliere un SPD con livello di protezione inferiore.
- 3) Installare un secondo dispositivo di protezione coordinato, il più vicino possibile al dispositivo da proteggere.

Per quanto riguarda la posa delle linee elettriche, è necessario che i conduttori siano quanto più vicini possibili e creino delle maglie di area limitata, al fine di evitare sovratensioni indotte dagli accoppiamenti induttivi tra le fasi, il neutro e il conduttore PE. Inoltre per evitare accoppiamenti elettromagnetici tra diversi tipi di cavi si raccomanda di mantenere cavi protetti e cavi non protetti lontani gli uni dagli altri (più di 30 cm) e che qualora non fosse possibile evitare un incrocio tra questi, esso avvenga ad angolo retto. Infine è di fondamentale importanza controllare l'equipotenzialità delle messe a terra di tutte le apparecchiature al fine di evitare cortocircuiti.

Per quanto riguarda la sezione dei collegamenti, la sezione dei cavi tra conduttori attivi e SPD deve essere almeno la stessa dei cavi a monte. Per i cavi tra SPD e terra la sezione

minima è di 3 mm² in assenza di parafulmine e di 5 mm² in presenza di esso (Sono comunque consigliate sezioni superiori per mantenere un margine di sicurezza, 10-20 mm²).

4. CONFRONTO CON INTERRUTTORE AUTOMATICO

L'interruttore magnetotermico differenziale è un dispositivo di sicurezza che ha la funzione di interrompere il flusso di energia quando viene rilevata una dispersione di corrente oppure quando avviene un contatto diretto o indiretto. Il suo utilizzo è previsto per proteggere cose e persone quando c'è un filo elettrico non isolato, quando si viene a contatto con un oggetto metallico che si trovi in tensione per un problema dell'isolamento o quando ci sono perdite di isolamento. L'interruttore magnetotermico differenziale comporta tre tipi di protezioni: magnetica, termica e differenziale. Al suo interno troviamo due sezioni diverse, che operano seguendo altrettanti principi fisici. La sezione magnetica evidenzia un eventuale cortocircuito rilevando lo sbalzo immediato del flusso di corrente. Quest'ultimo crea infatti un campo magnetico che fa scattare subito l'interruttore. La sezione termica si aziona mediante una resistenza elettrica. Al suo interno ha una lamina bimetallica che con la dilatazione termica si piega fino a scattare. L'interruttore differenziale si aziona quando viene a crearsi un guasto verso terra o in caso di contatti diretti o indiretti con cose o persone.



Fig. 4.1 - Magnetotermico differenziale in catalogo di ABB, modello DS201.

Fig. 4.2 – Scaricatore di sovratensione domestico in catalogo di ABB – SPD OVR PLUS.



Si nota come forma e dimensione dei due componenti (Fig. 4.1 e Fig. 4.2) siano molto simili tra loro, tuttavia in alcuni punti sono molto diversi:

- 1) Lo scaricatore, in una rete trifase, è più performante nella versione 3N (trifase e neutro), mentre per l'interruttore si preferisce la versione a 4 fasi.
- 2) Lo scaricatore è cablato in parallelo, mentre l'interruttore è connesso in serie.
- 3) La tensione nominale corrisponde alla differenza di potenziale tra fase e terra per uno scaricatore, mentre corrisponde alla tensione tra le fasi o tra fase e neutro per un interruttore.
- 4) Per lo scaricatore viene definita una corrente in kA corrispondente alla corrente di scarica nominale o massima (I_n o I_{max}), per l'interruttore invece corrisponde al potere d'interruzione a 50 Hz (la corrente massima entro la quale il componente stesso è in grado di aprire il circuito).
- 5) Uno scaricatore può intervenire e continuare a lavorare, solitamente è previsto che possa funzionare 20 volte con la sua corrente di scarica nominale. Un interruttore, una volta che è stato azionato, deve essere riarmato dopo la verifica dell'impianto.
- 6) In caso di scarica interviene sempre per primo l'SPD a monte dell'impianto, tutti gli altri intervengono in cascata per ridurre l'effetto della scarica. Per quanto riguarda gli interruttori interviene solo quello subito a monte del guasto per evitare di isolare parti di impianto che non lo necessitano.
- 7) L'SPD cortocircuita appositamente fasi e terra per un brevissimo istante, dopodiché viene ripristinato l'isolamento. L'interruttore invece vede il corto circuito come guasto e apre il circuito.

In sostanza scaricatori e interruttori automatici sono due prodotti complementari per la protezione dei quadri elettrici, ognuno ha la propria differente funzione ma entrambi hanno lo scopo di aumentare la sicurezza dell'impianto.

5. PROTEZIONE DI IMPIANTI FOTOVOLTAICI

Al 31 dicembre 2019 risultano installati in Italia 880.090 impianti fotovoltaici, per una potenza complessiva pari a 20.865 MW (fonte: GSE – Rapporto statistico 2019). Considerando che la produzione di energia elettrica da questi impianti risulta essere generalmente meno costosa e più pulita rispetto ad altri, e che garantisce alla rete un elevato grado di indipendenza, il numero di impianti è destinato ad aumentare. Tuttavia va tenuto presente che questo tipo di impianto è sempre soggetto ai fenomeni atmosferici e deve resistere ad essi per decenni. I cavi dei sistemi fotovoltaici spesso entrano all'interno delle strutture, quindi in caso di fulminazione non solo vengono generate sovratensioni che possono danneggiare l'impianto di generazione, compresi inverter e dispositivi elettronici di controllo, ma anche le apparecchiature all'interno degli edifici stessi. Per questo motivo è quasi sempre necessario dotare il sistema di una protezione, che garantisca al contempo una contromisura contro il rischio di incendi e una sicurezza per le persone nelle vicinanze. I dispositivi di protezione SPD si sono rivelati molto efficaci per la salvaguardia dei sistemi elettrici dai picchi di tensione dovuti ai fulmini.

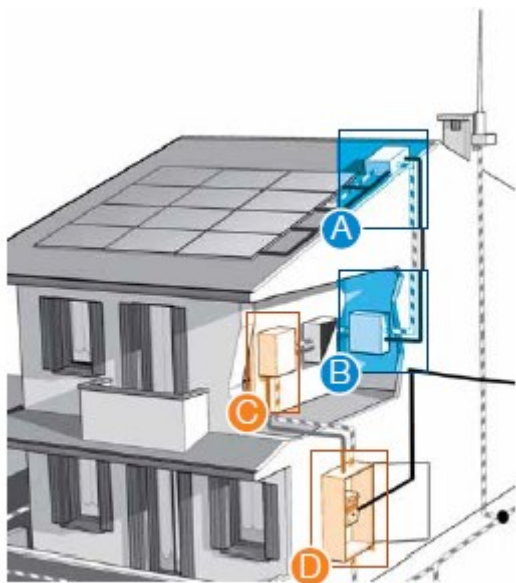


Fig. 5.1 – Impianto fotovoltaico montato sul tetto di un edificio domestico. Sono messe in evidenza le quattro zone da proteggere.

Sia che si tratti di un impianto di produzione che di un impianto domestico, è sempre possibile definire quattro zone che devono essere messe in sicurezza. La Zona A rappresenta il quadro di campo o parallelo, percorso da corrente continua e si trova subito a contatto con i pannelli fotovoltaici. Se esso si trova ad una distanza dall'inverter superiore a 10 m deve essere prevista una protezione delle stringhe dei pannelli contro le sovratensioni di origine atmosferica. La Zona B si riferisce al lato corrente continua dell'inverter e deve sempre essere protetta da un dispositivo. Nelle Zone A e B sono solitamente installati scaricatori di tensione per la tensione continua da 670 V o 1000 V a seconda dell'impianto e nel caso in cui la

corrente di cortocircuito nel punto di installazione dello scaricatore raggiunga i 100 A c.c. deve essere previsto un fusibile di backup (generalmente 10 A gR, ossia un fusibile a campo pieno per la protezione di semiconduttori). Il lato corrente alternata dell'inverter e il punto di consegna alla rete sono invece rappresentati da Zona C e Zona D rispettivamente. Per la Zona C è da prevedere una protezione solo nel caso in cui la distanza tra inverter e il punto di consegna superi i 10 m, mentre per la Zona D è sempre obbligatorio. In queste due zone vengono installati scaricatori per la tensione alternata a 3 poli e neutro, a 3 poli o 1 polo e neutro e deve sempre essere presente una protezione di backup (generalmente fusibili 16 A gG o 125 A gG, ossia fusibili a campo pieno ad uso generale).

Lato corrente continua spesso sono richiesti interruttori e fusibili di maggiori dimensioni e un disconnettore per il dispositivo di protezione contro le sovratensioni, adatti a far fronte alle correnti fotovoltaiche; questo perché le caratteristiche U/I dei generatori di corrente fotovoltaici presentano una curva caratteristica non lineare e possono provocare la persistenza a lungo termine degli archi innescati.

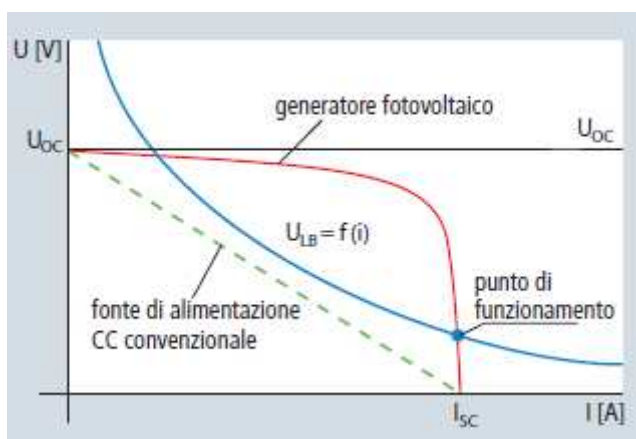


Fig. 5.2 – Curva caratteristica di una sorgente a corrente continua convenzionale rispetto a quella di un generatore fotovoltaico.

Esistono degli scaricatori di Tipo 1 che posseggono un dispositivo di commutazione a corrente continua a tre stadi integrato, che comprende un disconnettore, un dispositivo di cortocircuito a controllo termodinamico e un fusibile di by-pass. Questi consentono di scollegare in sicurezza lo scaricatore dal generatore di tensione in caso di sovraccarico e di estinguere in modo affidabile gli archi in corrente continua. È bene ricordare infatti che risulta sempre essere più complicato interrompere un arco in corrente continua piuttosto che uno arco in corrente alternata, poiché non esiste un passaggio naturale per lo zero dell'onda di corrente; il disconnettore termico contenuto negli scaricatori per fotovoltaico è in grado di spegnere l'arco elettrico grazie all'apertura veloce del contatto tra i due elettrodi e di creare un isolamento delle parti con l'inserimento di un ostacolo nel percorso.

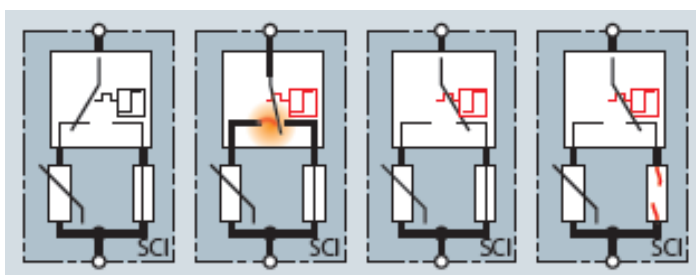


Fig. 5.3 – Fasi di commutazione del dispositivo di commutazione a corrente continua in cui si vede il primo distacco, l'estinzione dell'arco e infine il ripristino dell'isolamento elettrico.

Per un funzionamento affidabile di SPD di Tipo 2 per circuiti fotovoltaici in corrente continua, esistono limitatori di sovratensione che dispongono di un circuito di protezione a Y a prova di guasto, oltre che della tecnologia di commutazione precedentemente citata, e possono essere collegati a generatori fotovoltaici fino a 1000 A senza l'impiego di prefusibili. Queste tecnologie combinate prevengono i danni al dispositivo di protezione dovuti ai guasti dell'isolamento nel circuito e prevengono il rischio di incendio dovuto ai sovraccarichi degli scaricatori, il tutto senza interrompere il funzionamento del sistema fotovoltaico.

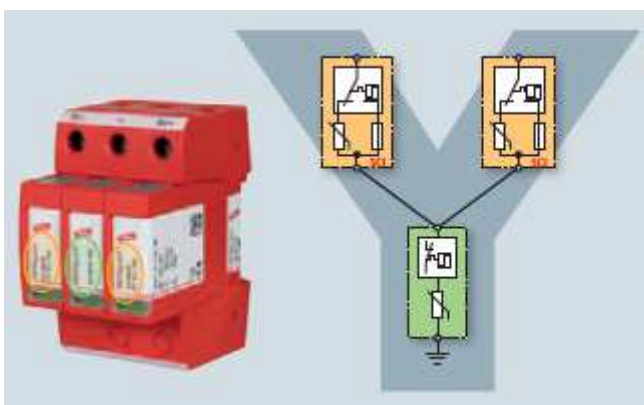


Fig. 5.4 – Limitatore di sovratensione modulare di Tipo 2 con circuito a Y a prova di errore e dispositivo di commutazione a corrente continua a tre stadi; esempio di un dispositivo in catalogo DEHN – Dehnguard M YPV SCI.

Per quanto riguarda la selezione dei dispositivi SPD, bisogna tenere presente il livello di protezione della tensione U_p . In un sistema fotovoltaico, infatti, la rigidità dielettrica dell'apparecchiatura varia a seconda del livello di tensione di funzionamento, quindi è necessario che il livello di protezione della tensione U_p dello scaricatore sia inferiore rispetto alla rigidità dielettrica del sistema da proteggere. La norma CEI CLC/TS 50539-12 richiede che U_p sia almeno il 20% più piccola della rigidità dielettrica dell'impianto fotovoltaico.

5.1 IMPIANTO FOTOVOLTAICO SU UN EDIFICIO DOTATO DI PROTEZIONE CONTRO I FULMINI ESTERNA

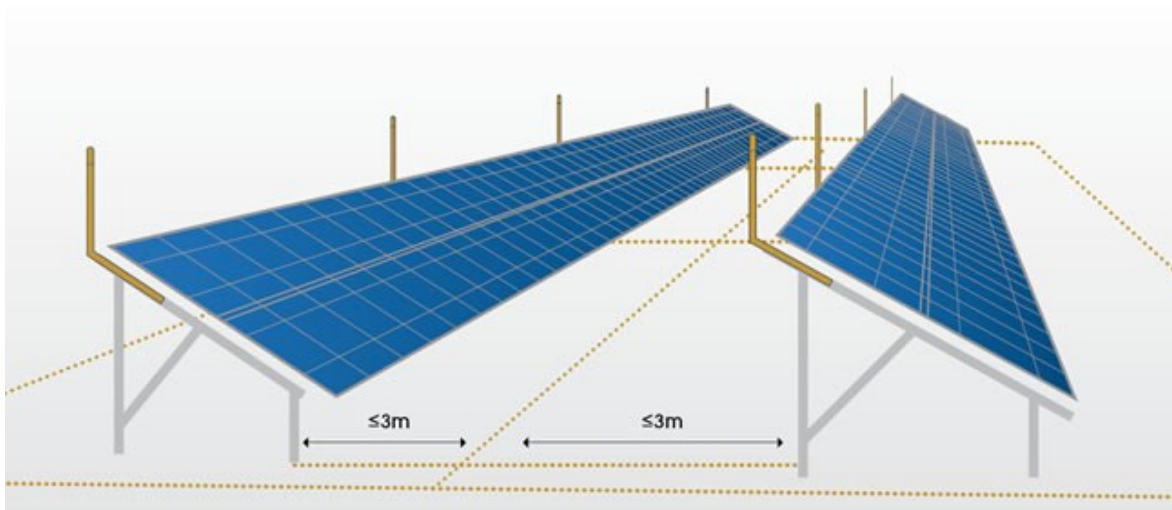


Fig. 5.5 – Schema di un impianto fotovoltaico protetto da parafulmine.

Il principale obiettivo della protezione è quello di evitare danni diretti a persone e beni a causa di una fulminazione con conseguente possibilità di incendio. Il sistema fotovoltaico non deve interferire con la protezione esterna e deve essere esso stesso protetto dalla fulminazione diretta, quindi deve essere inserito nel volume protetto dalle aste di captazione e bisogna sempre mantenere una minima distanza di isolamento tra le parti conduttrici dell'impianto fotovoltaico e gli oggetti metallici del sistema di protezione, quali le aste di captazione. Per determinare qual è il volume protetto esistono due metodi: metodo dell'angolo di protezione o il metodo della sfera rotolante.



Fig. 5.6 – Confronto tra il metodo dell'angolo di protezione e il metodo della sfera rotolante per la determinazione del volume protetto.

Il metodo della sfera rotolante è basato sul modello elettrico-geometrico, secondo il quale la punta del canale discendente di un fulmine si avvicina agli oggetti sulla terra in modo arbitrario e non influenzato fino alla distanza della scarica disruptiva finale. Quindi il punto di abbattimento viene determinato dall'oggetto che si trova a distanza minore. In prima approssimazione è possibile ipotizzare una proporzionalità diretta tra il valore di cresta della corrente del fulmine I e la distanza della scarica disruptiva finale (che rappresenta il raggio della sfera rotolante R):

$$R = 10 \cdot I^{0,65}$$

Il metodo dell'angolo di protezione è dedotto dal modello di fulmine geometrico-elettrico. L'angolo α viene determinato a partire dal raggio della sfera rotolante, quando una linea obliqua taglia la sfera rotolante in modo che le superfici così ottenute siano di misura uguale (come mostrato in Fig. 5.7). Questo metodo viene utilizzato per edifici di forma simmetrica o per strutture sul tetto, come le aste di captazione.

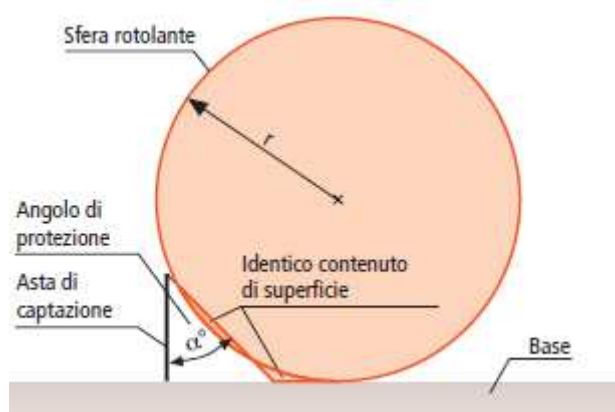


Fig. 5.7 – Schema per la determinazione dell'angolo di protezione a partire dal raggio della sfera rotolante.

Un compito importante è anche svolto dal collegamento equipotenziale antifulmine, ottenuto collegando direttamente tutti i sistemi metallici (e indirettamente tutte le parti alimentate) attraverso scaricatori di Tipo 1 al sistema dei dispersori. Il collegamento equipotenziale ha il dovere di impedire l'ingresso di correnti pericolose all'interno dell'edificio e deve essere installato nella posizione più vicina possibile all'entrata dell'edificio stesso. Qualora la distanza tra cavo e inverter fosse inferiore a 10 m, il solo scaricatore di Tipo 1 sarebbe sufficiente per la protezione dell'impianto, in caso contrario andrebbero installati di conseguenza ulteriori scaricatori contro le sovratensioni di Tipo 2 a monte dell'ingresso in corrente alternata degli inverter. Nel lato dell'inverter in corrente continua ci devono sempre essere scaricatori di Tipo 2 per impianti fotovoltaici e, in caso siano presenti anche collegamenti a linee dati, bisogna installare anche dei dispositivi per sovratensioni specifici per salvaguardare la trasmissione corretta dei dati.

Un'altra possibilità per mantenere la minima distanza di isolamento è quella di utilizzare dei conduttori isolati HVI (*High Voltage Insulation*) resistenti alle tensioni elevate e che possono entrare direttamente in contatto con il sistema fotovoltaico.

5.2 PROTEZIONE CONTRO FULMINI E SOVRATENSIONI PER IMPIANTI FOTOVOLTAICI A TERRA



Fig. 5.8 – Impianto fotovoltaico a terra.

Le moderne centrali fotovoltaiche a terra possono raggiungere una capacità di 100 MW o superiore, direttamente collegate alla rete di produzione di media o alta tensione. Esse devono assicurare un funzionamento costante e registrare il minor numero di perdite di produzione possibile. L'esperienza ha evidenziato come le regioni soggette ad un elevato irraggiamento solare unito ad un'alta umidità nell'aria siano maggiormente colpite da fulmini, quindi, dal momento che gli impianti fotovoltaici sono esposti alle condizioni atmosferiche per decenni, risulta necessario un sistema di protezione contro le fulminazioni. I danni che possono verificarsi derivano dagli effetti distruttivi dei fulmini stessi e alle sovratensioni provocate dall'accoppiamento induttivo o capacitivo legato al campo elettromagnetico che viene creato. Inoltre, i picchi di tensione, che si verificano nel circuito in corrente alternata a monte, possono causare danneggiamenti ai moduli fotovoltaici, agli inverter, alle centraline di carica, all'impianto di monitoraggio e ai sistemi di comunicazione eventualmente presenti. Per un funzionamento più sicuro, il rischio di fulminazione deve essere valutato secondo la norma CEI EN 62305-2 (che si riferisce alla valutazione del rischio dovuto a fulmini a terra, ed ha lo scopo di fornire la procedura per la determinazione di detto rischio) e i risultati di questa analisi sono poi tenuti in considerazione per la fase di progettazione.

Come gli impianti fotovoltaici costruiti sui tetti degli edifici, anche gli impianti a terra devono essere installati nel volume protetto definito dai sistemi di captazione. Le aste di captazione formano un volume protetto che copre edifici operativi, contenitori modulari e cavi. Per evitare forti accoppiamenti induttivi legati alle interferenze, è bene installare le scatole di derivazione del generatore montate su contenitori modulari e gli inverter nel modo più decentrato possibile rispetto al sistema di captazione.



Fig. 5.9 – Schema di un impianto di messa a terra secondo la norma IEC EN 62305-3 (“Danno materiale alle strutture e pericolo per le persone”).

L’impianto di messa a terra costituisce la base per la realizzazione di un’efficace protezione contro sovratensioni e fulminazioni. Esso è solitamente costituito di una resistenza di terra inferiore a 10Ω e una maglia di filo in acciaio inossidabile da 10 mm. La rete a maglie viene spesso installata seguendo le griglie dei cavi esistenti e dovrebbe essere chiusa. L’impianto di messa a terra dei generatori fotovoltaici e degli edifici è collegato tramite un nastro o un filo tondo di acciaio inossidabile, in questo modo l’interconnessione riduce la resistenza di terra totale e si viene a creare una superficie equipotenziale che riduce notevolmente la tensione sulle linee di collegamento elettrico. Anche i supporti metallici dei moduli fotovoltaici devono essere collegati all’impianto di messa a terra e le fondazioni a pali o a viti possono fungere da dispersori se hanno il materiale e lo spessore della parete adeguati, come indicato in normativa.

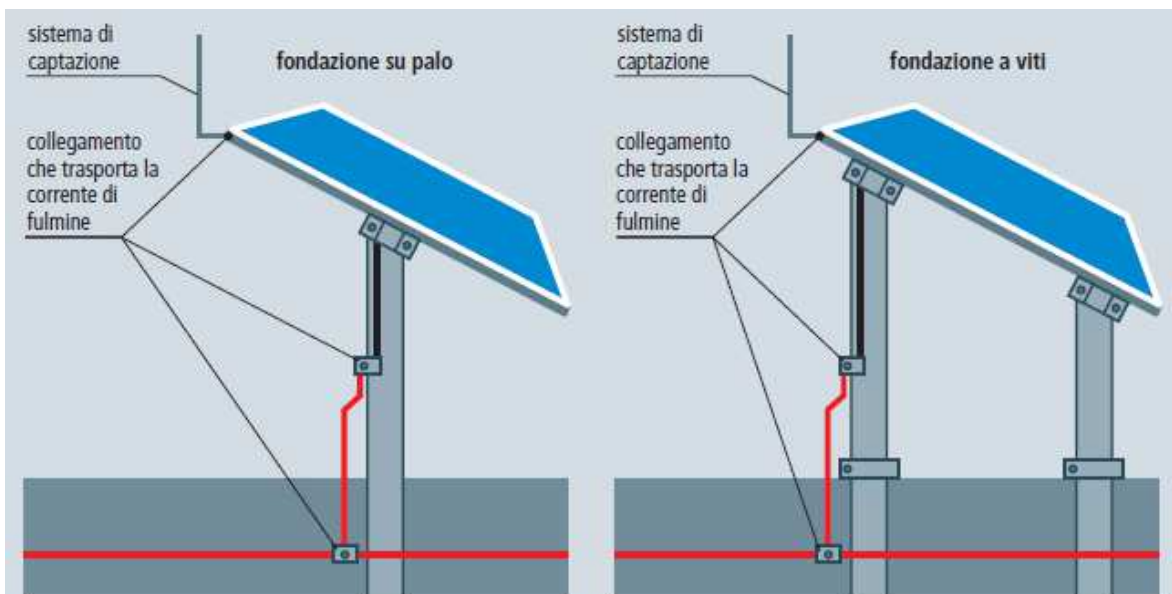


Fig. 5.10 – Fondazione a pali e a viti dotate di collegamento tra captatori e dispersori della corrente di fulmine.

Il sistema di captazione fa in modo che il flusso di corrente prodotta dai fulmini non provochi gravi danni all'impianto di produzione, tuttavia è importante che le celle non vengano ombreggiate dalle aste o altri elementi. Le ombre diffuse non sono un problema per l'impianto, ma quelle nette influenzano negativamente il sistema fotovoltaico e la sua resa. La distanza minima necessaria può essere calcolata in base al diametro dell'asta di captazione.

In un impianto fotovoltaico a terra l'intensità delle correnti di fulmine dipende dal tipo di impianto di captazione, dalla resistività del suolo in cui è installato e dal tipo di cavi utilizzati per i collegamenti elettrici. Negli impianti con inverter centrale ci saranno linee in corrente continua che attraversano il terreno, saranno dunque richiesti scaricatori di Tipo 1 in corrente continua con una capacità di scarica di 10 kA e con una corrente di corto circuito nominale sufficientemente elevata, che deve essere specificata dal costruttore (secondo la norma EN 50539-11, "*Low-voltage surge protective devices - Surge protective devices for specific application including d.c. Part 11: Requirements and tests for SPDs in photovoltaic applications*"). La protezione dalle correnti inverse è affidata ai fusibili, che possono agire anche dopo alcuni minuti, dunque i dispositivi di protezione devono essere progettati per la corrente totale, di esercizio e inversa, e garantire lo scollegamento automatico senza arco in caso di sovraccarico. La corrente di corto circuito nominale dovrà essere quindi maggiore della massima corrente del sistema fotovoltaico.

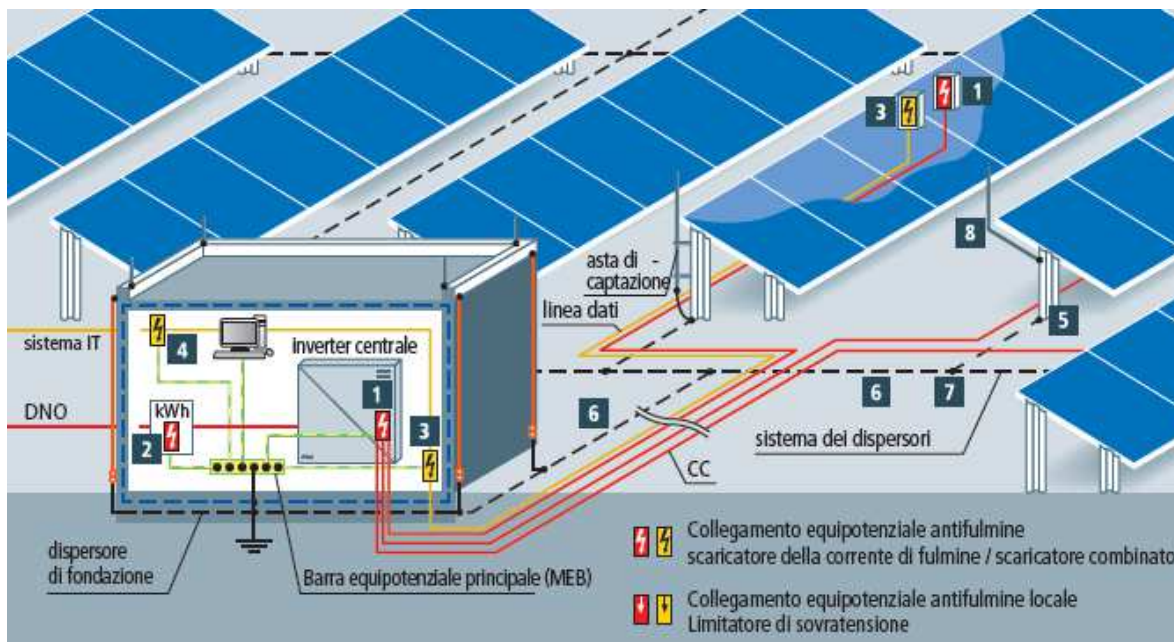


Fig. 5.11 – Schema di un impianto con inverter centrale: 1) Ingresso c.c. dell'inverter. 2) Lato c.a. della connessione alla rete. 3) Interfaccia dati. 4) Manutenzione remota. 5) Collegamento equipotenziale. 6) Conduttore di terra. 7) Elemento di connessione dell'impianto di messa a terra. 8) Dispositivo di captazione.

In un impianto fotovoltaico con inverter di stringa decentrati, invece, la maggior parte dei cavi di alimentazione si trovano sul lato in corrente alternata, poiché gli inverter sono installati sul terreno sotto i moduli dei generatori corrispondenti, e assumono le funzioni tipiche delle scatole di derivazione del generatore. La distribuzione delle correnti di fulminazione dipende da come sono disposti i cavi di alimentazione (quindi varia se lo schema è a inverter centralizzato o a stringa). Se ci sono gli inverter a stringa, i cavi di alimentazione fungono anche da collegamento equipotenziale tra la messa a terra del gruppo colpito dal fulmine e la superficie equipotenziale all'ingresso del trasformatore. La differenza rispetto all'inverter centralizzato è che in questo caso le correnti parziali di fulminazione passano nelle linee a corrente alternata, perciò vengono installati scaricatori di Tipo 1 sul lato in corrente alternata e sul lato di bassa tensione del trasformatore di alimentazione. Sul lato a corrente continua degli inverter di stringa sono tipicamente impiegati scaricatori di Tipo 2. Gli scaricatori producono anche una protezione da corrente indotta per tutte le uscite dell'inverter fino ad una distanza di 10 m, così come per altre apparecchiature poste in vicinanza, ad esempio una centralina di allarme o un server web.

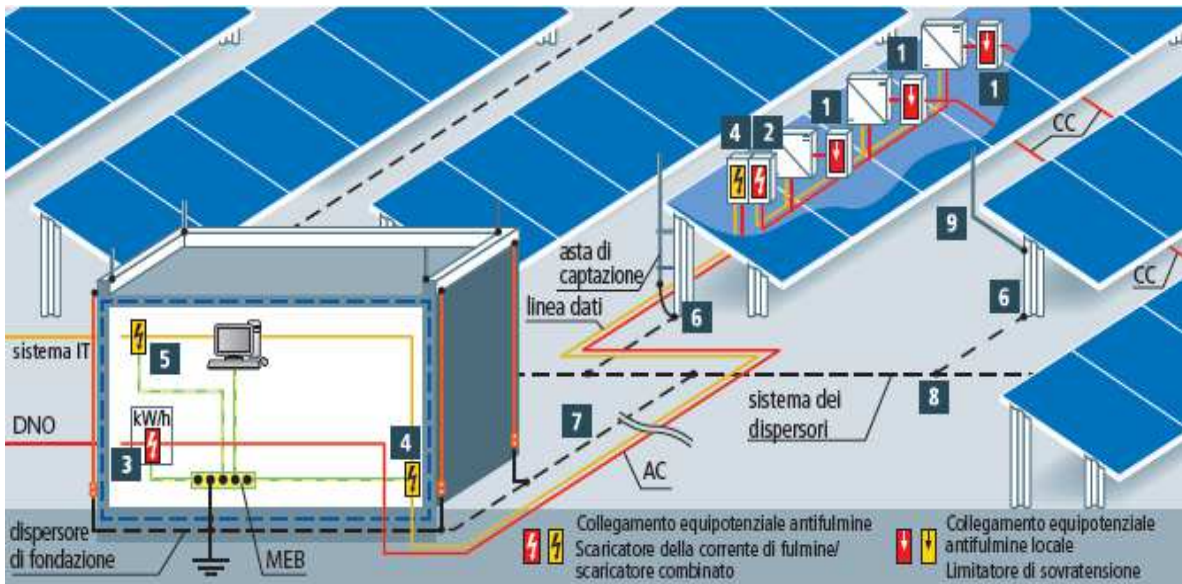


Fig. 5.12 – Schema di un impianto con inverter a sinistra: 1) Ingresso in corrente continua dell’inverter. 2) Lato corrente alternata dell’inverter. 3) Lato c.a. del collegamento alla rete. 4) Interfaccia dati. 5) Manutenzione remota. 6) Collegamento equipotenziale. 7) Conduttore di terra. 8) Morsetto di connessione. 9) Dispositivo di captazione.

In quasi tutte le centrali elettriche sono poi presenti degli edifici operativi che hanno il compito di raccogliere i dati provenienti dal terreno, dalle operazioni di manutenzione e dal gestore della rete. Lo scambio di dati deve essere garantito in modo affidabile per tutto il funzionamento al fine di determinare le cause di eventuali guasti e potervi porre rimedio con tempestività. Di conseguenza per la protezione di queste apparecchiature andranno installati degli scaricatori appositi che possono adattarsi alle tensioni dei singoli segnali, che saranno inferiori a quelle dell’impianto elettrico. Anche eventuali linee di collegamento ISDN e ADSL saranno protette da specifici dispositivi di protezione contro le sovratensioni. Le linee dati che provengono dalla sala di controllo vengono installate assieme alle linee di alimentazione (in corrente alternata o continua). A causa della breve lunghezza delle linee del bus di campo, i cavi delle linee dati vengono disposti in modo perpendicolare rispetto alla struttura di sostegno dei moduli fotovoltaici ed è possibile che in caso di fulminazione si vengano a creare delle ampie spire di induzione tra le file dei moduli e le linee dati, favorendo transitori causati dalle correnti dei fulmini che intaccano queste linee. Pertanto, le linee dati devono essere protette installando degli scaricatori nelle scatole di derivazione del generatore o negli inverter di stringa e le relative schermature devono essere collegate con il sistema di messa a terra. Una protezione coerente contro fulmini e sovratensioni per tutti i sistemi consente di aumentare notevolmente il rendimento di queste centrali energetiche riducendo così i tempi di assistenza e manutenzione, insieme ai relativi costi.

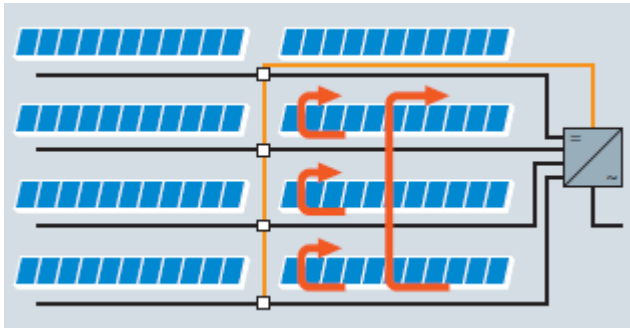


Fig. 5.13 – Rappresentazione del principio di induzione negli impianti fotovoltaici. I collegamenti neri rappresentano le linee di alimentazione, quelli arancioni invece le linee dati, collegate alla scatola di derivazione del monitoraggio del generatore.

6. SCARICATORI PER LINEE DATI E SISTEMI DI TELECOMUNICAZIONE

Non sempre risulta necessario provvedere i sistemi elettronici, anche se sensibili, di dispositivi per la loro protezione da sovratensioni transitorie. Questo viene deciso una volta che l'equipaggiamento è stato installato e ne è stato calcolato il rischio a cui è sottoposto, prendendo anche in considerazione, tra le altre cose, il luogo in cui è inserito e il valore dell'equipaggiamento stesso. Le sovratensioni transitorie sono fenomeni di breve durata, ma di alta intensità; esse possono infatti raggiungere 6000 V in una rete di bassa tensione, con una durata non superiore ad un millisecondo. La causa più comune di queste sovratensioni è la fulminazione, con conseguenze che possono portare al danneggiamento dell'isolamento dei cavi e alla riduzione della vita dei dispositivi elettronici, nel peggiore dei casi attraverso incendi e scariche elettriche. Comunque, le apparecchiature elettriche ed elettroniche sono continuamente interessate dai transitori di tensione che sono dovuti a manovre elettriche della rete di alimentazione. Anche se questi transitori raggiungono valori di tensione minori rispetto a quelli dovuti a fulminazioni, essi si verificano con più regolarità; di conseguenza i componenti elettronici risentono maggiormente di questi fenomeni e si degradano più velocemente a causa dello stress a cui sono sottoposti.

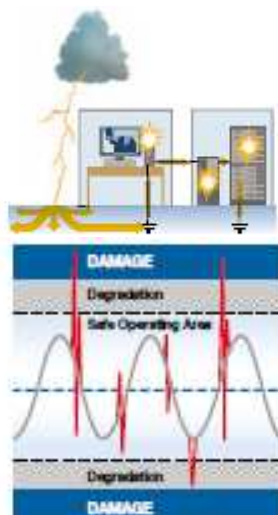


Fig. 6.1 – Effetti dei transitori sui dispositivi elettronici.



Fig. 6.2 – Una sovratensione transitoria porta un dispositivo a lavorare fuori dalla zona operativa sicura, portando al degrado o al danneggiamento del dispositivo stesso.

Fig. 6.3 – Danneggiamento di una scheda a circuito stampato (PCB) in seguito ad un transitorio di tensione.

Per difendere le apparecchiature elettroniche all'interno di un edificio, tutti i cavi che entrano ed escono dalla struttura devono essere protetti. Tutti i prodotti in commercio sono progettati per fornire una semplice integrazione al sistema, raggiungendo i più alti livelli di sicurezza contro le sovratensioni transitorie. Essi vengono classificati in base ad alcune caratteristiche che definiscono gli scaricatori stessi. Una di queste è la zona di protezione (*Lightning Protection Zone – LPZ*) che indica il punto di installazione dello scaricatore. Il *Signal/Telecom Test Category* indica a quali tipologie di test sono stati sottoposti i prodotti, accompagnati dai risultati che sono stati ottenuti durante i transitori di tensione. La *Current Rating* indica la massima corrente continua nominale di linea che lo scaricatore può sopportare per una linea dati, di segnali, o telefonica; la massima corrente nominale deve sempre superare il valore di picco di corrente che entra nel sistema, per consentire il normale funzionamento. Il modo comune (*Common Mode*) indica che lo scaricatore offre una protezione per i conduttori verso terra; per una linea dati o di telecomunicazione significa che la protezione è espressa tra le linee di segnale e terra. La *Full Mode* indica che lo scaricatore offre una protezione in tutti i possibili modi, sia rispetto terra sia differenziale; la protezione di tipo differenziale può essere critica per linee di dati molto sensibili, poiché non è riferita ad un livello di tensione assoluto, quale la terra. Gli scaricatori di tipo migliorato (*Enhanced SPDs*) hanno livelli di protezione (U_p) più bassi, e quindi migliori, perciò riducono il rischio di danneggiamento per i componenti elettronici, oltre a quello di infortuni verso le persone che lavorano a contatto con essi. Una resistenza di piccolo valore (*Low In-line Resistance*) è preferibile per ridurre le cadute di tensione attraverso gli scaricatori ed evitare malfunzionamenti del sistema, solitamente vengono utilizzate resistenze dell'ordine di un Ohm.

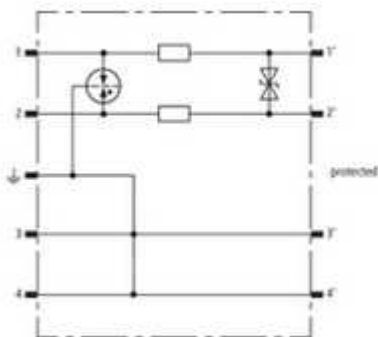


Fig. 6.4 – Le resistenze sono inserite all'interno del circuito per ridurre le cadute di tensione ai morsetti in uscita.

L'icona *Replaceable Protection Module* indica che quello specifico componente dello scaricatore può essere semplicemente rimosso e sostituito quando arriva a fine vita, riducendo così i tempi e i costi di manutenzione. Una caratteristica addizionale degli scaricatori può essere la *LED Optional Indication*, la quale suggerisce che il prodotto può essere integrato con un LED che indica lo stato operativo, in base al colore del LED è possibile capire se il sistema è funzionante o ha subito un guasto; questo consente una facile e rapida sostituzione dei dispositivi, soprattutto dove è presente un elevato numero di componenti. L'*High Bandwidth SPDs* permette di avere il completo range di frequenza di trasmissione del

segnale, le frequenze di segnali che eccedono questa banda potrebbero essere distorte portando ad una perdita nella trasmissione dei dati; la larghezza della banda di frequenza dello scaricatore deve sempre eccedere rispetto a quella del sistema che sta proteggendo, per assicurare la corretta trasmissione del segnale. Il *BX IP (International Protection rating for ready-Boxed)* è un indice internazionale di protezione usato tipicamente in ambienti molto polverosi e umidi, esso rappresenta gli effetti dovuti all'introduzione di oggetti solidi (tra cui polveri) e di acqua nel sistema elettrico. Il marchio *Ultra Slim 7 mm Width* indica la caratteristica di uno scaricatore di essere adeguato all'installazione in ambienti molto stretti, o dove sono presenti in gran numero e non possono superare un certo volume per motivi logistici. La sigla *ATEX/IECex Approved* indica che lo scaricatore ha superato una serie di prove, divenendo adatto all'uso in determinati ambienti pericolosi. *Direct grounding for non-isolated screen* significa che in questo caso il collegamento di terra tra lo schermo dei cavi e il potenziale di riferimento è eseguito direttamente attraverso un conduttore metallico. Invece in caso di *Indirect grounding for isolated screen*, il collegamento avviene attraverso un dispositivo di scarica a gas.

OVR SL Series



Fig. 6.5 – Esempio di un prodotto dal catalogo di ABB.

OVR SL Series - Technical specification

Electrical specification	OVR SL06	OVR SL15	OVR SL30	OVR SL50	OVR SL110
ABB order code	7TCA085400R0360	7TCA085400R0361	7TCA085400R0363	7TCA085400R0364	7TCA085400R0362
Nominal voltage	6 V	15 V	30 V	50 V	110 V
Maximum working voltage U_c (RMS/DC)	5 V / 7.79 V	11 V / 16.7 V	25 V / 36.7 V	40 V / 56.7 V	93 V / 132 V
Current rating (signal)	750 mA				
In-line resistance (per line $\pm 10\%$)	1.0 Ω				
Bandwidth (-3 dB 50 Ω system)	45 MHz	45 MHz	45 MHz	45 MHz	45 MHz
Transient specification	OVR SL06	OVR SL15	OVR SL30	OVR SL50	OVR SL110
Let-through voltage (all conductors) U_p					
C2 test 4 kV 1.2/50 μ s, 2 kA 8/20 μ s to BS EN/EN/IEC 61643-21	36.0 V	38.4 V	63.0 V	90.3 V	185 V
C1 test 1 kV, 1.2/50 μ s, 0.5 kA 8/20 μ s to BS EN/EN/IEC 61643-21	26.2 V	29.4 V	51.3 V	77.2 V	175 V
B2 test 4 kV 10/700 μ s to BS EN/EN/IEC 61643-21	16.0 V	26.8 V	45.4 V	68.3 V	165 V
5 kV, 10/700 μ s	17.0 V	27.5 V	46.3 V	69.1 V	170 V
Maximum surge current					
D1 test 10/350 μ s to BS EN/EN/IEC 61643-21: - Per signal wire	1.25 kA				
8/20 μ s to ITU-T K.45:2003, - Per pair	2.5 kA				
IEEE C62.41.2:2002: - Per signal wire	10 kA				
- Per pair	20 kA				
Mechanical specification	OVR SL06	OVR SL15	OVR SL30	OVR SL50	OVR SL110
Temperature range	-40 to +80 °C				
Connection type	Screw terminal - maximum torque 0.8 Nm				
Conductor size (stranded)	4 mm ²				
Earth connection	Via DIN rail or 4 mm ² earth terminal - maximum torque 0.8 Nm				
Case material	FR Polymer UL-94 V-0				
Weight: - Unit	0.08 kg				
- Packaged (per 10)	0.85 kg				

Fig 6.6 – Tabella contenente le specifiche tecniche dei prodotti in catalogo di ABB, Serie OVR SL.

6.1 PROTEZIONI PER RETI ETHERNET E FAST ETHERNET

La tecnologia Ethernet attualmente è la più diffusa per il trasferimento dati di reti locali o LAN (*Local Area Network*). Il collegamento avviene attraverso cavi coassiali a 50 Ω , doppi ritorti, cavi in fibra ottica, o altri, e la velocità di trasmissione dei dati è solitamente di 100 Mbit/s, anche se sono in aumento le reti a 1000 Mbit/s. I malfunzionamenti causati dalle sovratensioni in questi sistemi possono influenzarne negativamente il funzionamento, portando anche a lunghi periodi di arresto. Sono quindi necessari sistemi di protezione affidabili contro le sovratensioni, oltre ad un backup periodico dei dati. Le possibili cause di danno negli impianti informatici possono essere sostanzialmente di tre tipi: fulmini a distanza che causano impulsi transitori nelle reti di alimentazioni, dei dati, o di telecomunicazione; fulmini nelle vicinanze che generano campi elettromagnetici che inducono gli impulsi transitori nelle reti; fulminazioni dirette che producono differenze di potenziali e correnti di fulmine non sostenibili dall'impianto stesso.

Per servizi quali telefoni analogici, linee ISDN (*Integrated Services Digital Network*) o altre tecnologie di rete, viene utilizzato come mezzo di connessione uniforme il cablaggio strutturato. Esso prevede cavi universali e indipendenti dall'applicazione, che non sono ottimizzati per una specifica funzione; questo assicura la possibilità di utilizzare tutti i protocolli attuali e futuri. Un sistema di cablaggio universale consiste di tre diversi livelli gerarchici:

- La dorsale primaria collega il quadro di distribuzione di un distretto (complesso di edifici) ai quadri di distribuzione dei singoli edifici. Nelle reti dati si impiegano principalmente cavi a fibre ottiche multimodali (50/125 μm) per lunghezze fino a 1500 m, in caso di distanze superiori si ricorre a fibre ottiche monomodali.
- La dorsale dell'edificio collega l'edificio ai quadri di distribuzione di piano. Vengono impiegati principalmente cavi a fibre ottiche da 50 μm e cavi bilanciati da 100 Ω , con una lunghezza che può arrivare a 500 m.
- Il cablaggio orizzontale (quadro di piano) comprende tutti i cavi delle stazioni di lavoro del piano e non deve superare i 90 m. Vengono utilizzati cavi in rame o cavi a fibre ottiche da 62,5 μm .

Le interfacce tra queste aree si trovano nei quadri di distribuzione passiva. Questi quadri di distribuzione collegano la dorsale primaria, la dorsale dell'edificio e il cablaggio orizzontale dei sistemi di cablaggio universale. Essi consentono di avviare i servizi di comunicazione in una stazione di lavoro semplicemente connettendo dei cavi collegamento. I quadri di distribuzione per i cavi in fibra ottica (dorsale di distretto e dorsale dell'edificio) e i doppini ritorti (collegamento orizzontale) variano in base al numero di porte. I sistemi di cablaggio strutturati collegano tutti gli apparecchi utilizzatori. Essi consentono la comunicazione tra telefoni, reti, sistemi di sicurezza, sistemi domotici, interconnessioni LAN e WLAN, nonché l'accesso alla rete Intranet e Internet. I sistemi di cablaggio generico garantiscono la flessibilità di impiego degli apparecchi utilizzatori. Si suppone che tutte le informazioni, quali i servizi di trasmissione dati, voce, televisione, automazione e controllo di macchine e impianti, verranno trasmesse via Ethernet per i prossimi anni e Ethernet diverrà così un concetto di trasmissione universale. Pertanto deve essere assicurata la compatibilità elettromagnetica (EMC), che viene definita come la capacità di un dispositivo di funzionare correttamente nel suo ambiente elettromagnetico senza provocare interferenze inaccettabili per i dispositivi, gli impianti o i sistemi all'interno di questo ambiente. È importante quindi considerare le condizioni dell'ambiente elettromagnetico, per esempio se vi possono essere potenziali fonti di interferenze elettromagnetiche, quale sia la qualità dell'alimentazione elettrica (armoniche, sfarfallamenti, cadute di tensione, sovratensioni, transitori), quale sia il rischio di fulminazione o la relativa frequenza.

Per garantire il corretto funzionamento delle reti dati, la loro progettazione deve comprendere un concetto di messa a terra e di collegamento equipotenziale in grado di fornire informazioni su:

- Percorsi e condutture per cavi,
- Struttura dei cavi,
- Componenti attivi,
- Protezione contro i fulmini,
- Protezione delle linee di segnale,
- Collegamento equipotenziale,
- Protezione dalle sovratensioni.

Le misure più importanti per assicurare la compatibilità elettromagnetica in una rete dati, e quindi la conseguente trasmissione dei segnali senza disturbi sono:

- Separazione delle fonti note di interferenze elettromagnetiche dai componenti informatici;
- Uso di condotti metallici chiusi e messi a terra e, se necessario, il collegamento dei dispositivi informatici solo tramite cavi a fibre ottiche;
- Utilizzo di circuiti separati per i dispositivi informatici, filtri contro i disturbi e gruppi di continuità per l'alimentazione, dove necessario;
- Evitare assolutamente di posare le linee di alimentazione e le linee dati dei dispositivi informatici parallelamente alle linee di alimentazione di forti carichi (a causa del rischio di sovratensioni di commutazione durante la commutazione dei carichi) e delle fonti di interferenza note (ad esempio controllori a tiristori);
- Utilizzare cavi dati schermati messi a terra su entrambe le estremità;

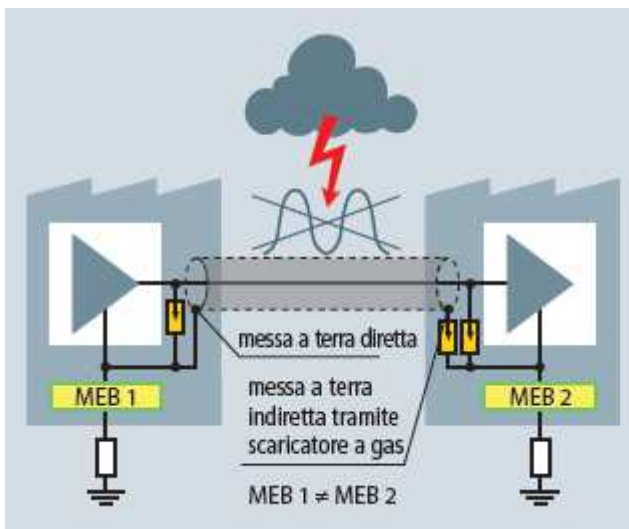


Fig. 6.6 – Collegamento della schermatura su entrambe le estremità. Schermatura contro l'accoppiamento capacitivo/induttivo e messa a terra diretta e indiretta della schermatura per evitare correnti di compensazione.

- Integrazione dell'armatura nel sistema equipotenziale per gli involucri di metallo e le protezioni;

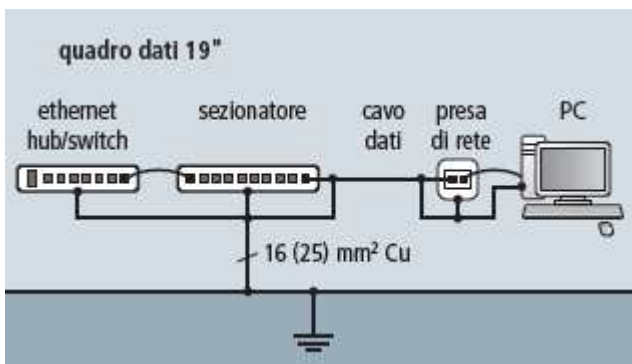


Fig. 6.7 – Collegamento equipotenziale di un impianto con cavi schermati.

- I cavi schermati per trasmissione dati e le linee di alimentazione devono utilizzare lo stesso condotto nella dosale dell'edificio; evitare l'installazione in condotti separati opposti l'uno all'altro; non superare i 20 cm di distanza tra questi due diversi tipi di cavi;
- Le linee di alimentazione per i dispositivi e le relative linee di dati devono passare lungo lo stesso percorso; i cavi devono essere separati con dei pettini fissacavi;
- Se viene installato sull'edificio un impianto di protezione antifulmine, vanno rispettate le distanze di isolamento delle linee dati e di alimentazione rispetto agli elementi della protezione esterna contro i fulmini; le linee dati e di alimentazione non devono essere disposte parallelamente alle calate della protezione;
- Utilizzare cavi a fibre ottiche per collegare dispositivi informatici in edifici diversi;
- Installare dei dispositivi di protezioni contro le sovratensioni nei circuiti di alimentazione e nel cablaggio orizzontale, per proteggerli dai transitori causati da operazioni di commutazione e scariche atmosferiche;



Fig. 6.8 – Dispositivo di protezione NET universale contro le sovratensioni per la protezione delle linee dati del quadro di piano.



Fig. 6.9 – Dispositivo di protezione universale contro le sovratensioni per la protezione delle linee di rete e delle linee dati (in figura un esempio di un prodotto del catalogo di Dehn, DEHNprotector).

- Preferire impianti di rete di tipo TN-S per evitare correnti di interferenza nelle schermature delle linee dati;
- Stabilire un collegamento equipotenziale di protezione principale con l'impianto di rete in un punto dell'edificio.

Per verificare la compatibilità elettromagnetica, le apparecchiature elettriche ed elettroniche devono possedere una certa immunità verso le interferenze. Il livello di immunità dipende dal livello di prova a cui il dispositivo è sottoposto, da 1 a 4. Il livello di prova 1 definisce i requisiti minimi per l'immunità di un dispositivo terminale. Per i sistemi informatici bisogna limitare le interferenze trasmesse a un livello accettabile, in modo da non superare il livello di immunità dei dispositivi. A seconda dell'applicazione e del tipo di progettazione, le interfacce informatiche dei dispositivi utilizzatori presentano diversi livelli di immunità. Quando si seleziona un adeguato limitatore, non sono importanti solo i parametri del sistema, ma anche se esso sia in grado di proteggere il dispositivo utilizzatore. Al fine di facilitare la selezione, è stata sviluppata un'indicazione distintiva della classe degli scaricatori per la famiglia di prodotti per le linee dati (indicati solitamente come Yellow/Line). Questa indicazione fornisce informazioni precise sull'adeguatezza dello scaricatore per il dispositivo utilizzatore. I limitatori correttamente dimensionati proteggono in modo appropriato i dispositivi utilizzatori contro i picchi di tensione e di potenza, aumentando di conseguenza la disponibilità dell'impianto.

6.2 PROTEZIONE DA SOVRATENSIONI PER M-BUS

Un M-bus (*Meter-bus*, apparecchio di misura, contatore) ha la funzione di trasmettere le letture dei contatori e dei consumi energetici. I dati possono essere letti da tutti i dispositivi collegati a un sistema M-bus, direttamente sul posto o in una sala di controllo esterna. Questo sistema consente la contabilizzazione dei costi di consumo e il controllo a distanza di sistemi

di teleriscaldamento, impianti di riscaldamento o interi edifici condominiali. Se i contatori si trovano nelle immediate vicinanze del quadro generale dell'impianto è preferibile adottare un sistema di controllo centralizzato, più semplice ed economico. In questo caso viene effettuato un collegamento a stella tra ciascun contatore e il quadro generale. In alternativa viene adottato un sistema di tipo decentrato, in cui i dati dei contatori installati in loco vengono prima raccolti in sottostazioni e poi inviati attraverso la linea bus al quadro centrale.

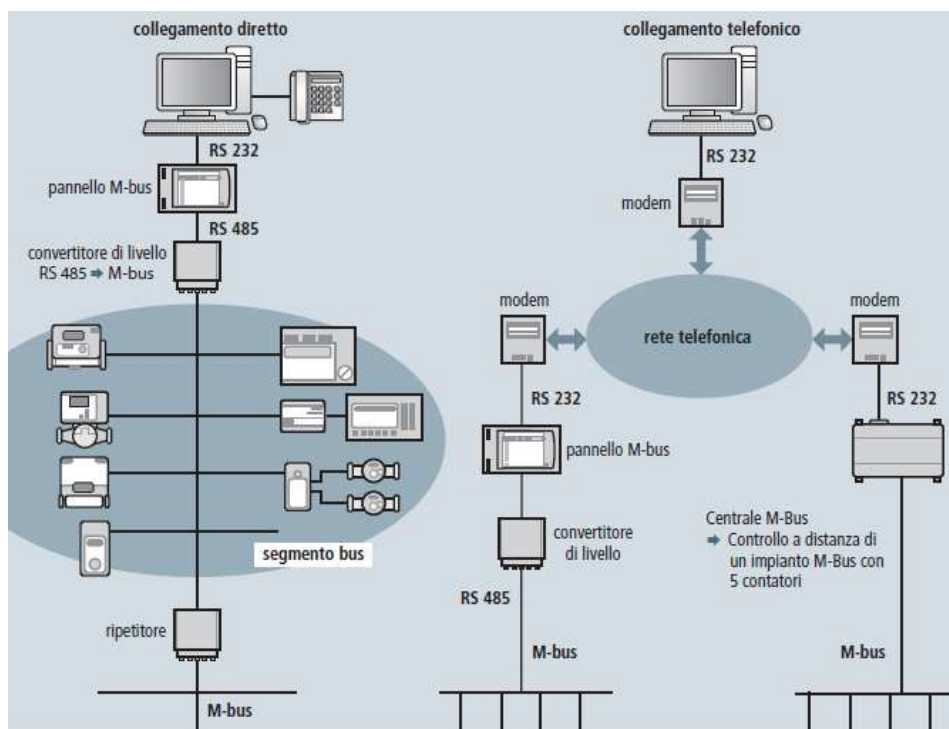


Fig. 6.10 – Esempio di un sistema M-bus con collegamento diretto o telefonico.

Un'unità centrale, ossia il master, che solitamente è un PC con convertitore di livello, comunica con i dispositivi a valle tramite una linea bus. L'installazione è divisa in segmenti M-bus tramite ripetitori, a cui possono essere collegati fino a 250 dispositivi slave, che possono essere contatori per il consumo di acqua, calore, energia elettrica, gas o sensori e attuatori di vario tipo. Il sistema M-bus si basa sul collegamento a due fili alimentato dal bus-master; tutti gli altri dispositivi non sono collegati a terra durante il funzionamento e la tensione massima del bus è di 42 V. Una centralina M-bus ha una corrente di riposo di circa 375 mA che alimenta diversi dispositivi con diversi carichi. La sezione delle linee in rame e la somma delle cadute di tensione nelle sezioni parziali definiscono la lunghezza massima della linea M-bus. Un altro aspetto fondamentale da tenere in considerazione in una linea M-bus è la sua velocità di trasmissione; essa è influenzata dalla resistenza e dalla capacità dei dispositivi di protezione.

Se il sistema M-bus è installato in un edificio dotato di protezione esterna contro i fulmini, è richiesta l'equipotenzialità antifulmine: tutti i cavi degli impianti di alimentazione e informatici che entrano o escono dall'edificio devono essere collegati al sistema equipotenziale antifulmine attraverso degli scaricatori per la corrente di fulmine. Se il sistema si trova invece in un edificio privo di protezione contro i fulmini esterna, devono essere i dispositivi di protezione contro le sovratensioni a proteggere l'impianto elettrico.

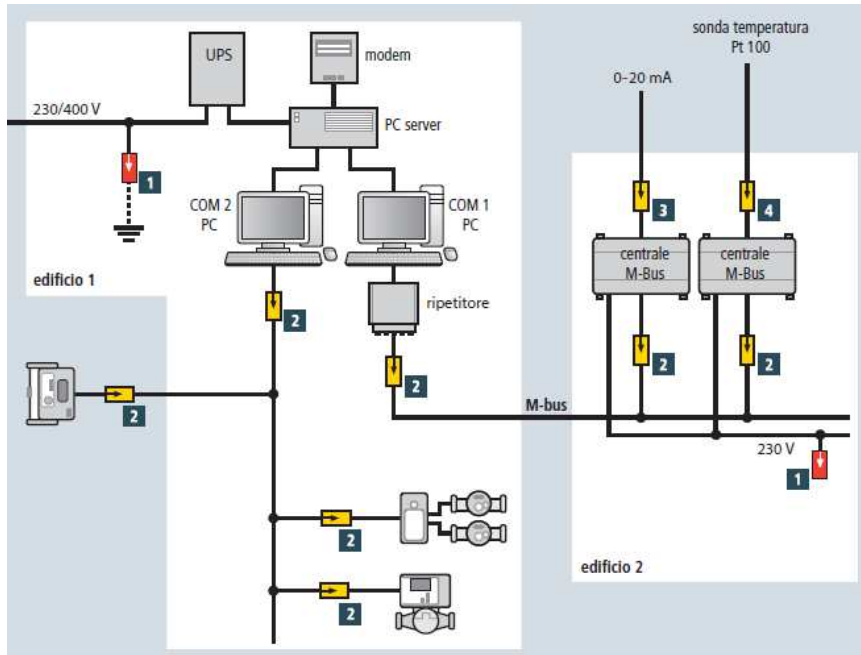


Fig. 6.11 – Schema di protezione in un edificio privo di protezione esterna: 1) Ingresso della linea di alimentazione. 2) M-bus. 3) Convertitore di segnale da 0-20 mA. 4) Sonda di temperatura PT 100.

In rosso sono rappresentati i dispositivi di protezione contro le sovratensioni per la tensione di rete, mentre in giallo sono rappresentati i dispositivi per la protezione contro le sovratensioni per le interfacce di segnale.

6.3 PROTEZIONE DA SOVRATENSIONE PER UTENZE DI TELECOMUNICAZIONE

Nei processi ad alta tecnologia degli impianti industriali e degli uffici, è di vitale importanza disporre di un'interfaccia di telecomunicazione in grado di funzionare senza interruzioni. Le reti con questo scopo si estendono per diversi km², è pertanto probabile che siano colpite da sovratensioni. Risulta dunque necessario dotare le strutture di un impianto di protezione contro i fulmini, esterna ed interna. Le linee, che entrano in vari edifici, possono essere caratterizzate da differenze di potenziale elevate, con il possibile aumento del potenziale dei conduttori per effetto dell'accoppiamento galvanico e induttivo. Inoltre, se queste linee sono disposte in parallelo alle linee di alta e bassa potenza, le sovratensioni di commutazione della rete elettrica possono causare guasti e interferenze all'impianto di telecomunicazione.

Per un collegamento ADSL, oltre al collegamento telefonico tradizionale, sono necessari, a seconda della variante di accesso, una scheda di rete o ATM nel PC e uno speciale modem ADSL più uno splitter per la separazione del traffico telefonico da quello dati. Il collegamento telefonico può essere eseguito a scelta come collegamento analogico o ISDN (*Integrated Service Digital Network*). Lo splitter separa il segnale vocale analogico o il segnale ISDN digitale dai dati ADSL tenendo conto di tutti i parametri di sistema importanti, come impedenze, attenuazioni, livelli o altro. Esso svolge quindi la funzione di un separatore di reti. Lo splitter è collegato sul lato entrata con la borchia telefonica. Sul lato in uscita, mette a disposizione del modem ADSL i segnali a frequenza più alta della banda ADSL, e controlla la comunicazione nella zona di bassa frequenza con la NT (Terminazione di Rete) oppure l'apparecchio utilizzatore analogico. Il modem ADSL è collegato al PC tramite cavo Ethernet (10 MBit/s), ATM25 o interfaccia USB e richiede una tensione alternata di alimentazione a 230 V.

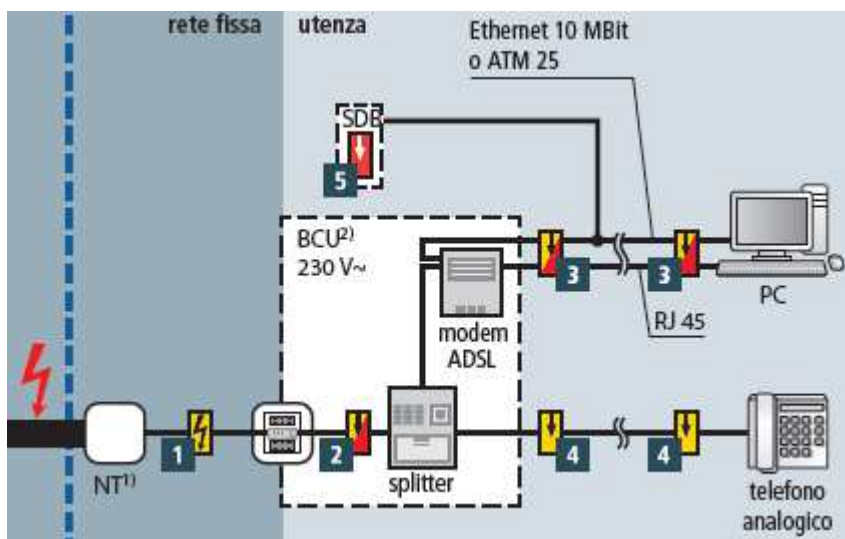


Fig. 6. 12 – Schema di sistema di protezione contro i fulmini e le sovratensioni per ADSL con terminale analogico.



Fig. 6.13 – Prodotto dal catalogo di Dehn, DEHN DPRO 230 LAN100, tipicamente utilizzato per la protezione di sistemi informatici per la telecomunicazione, con frequenza di ingresso AC di 50-60 Hz e tensione nominale all'ingresso di 230 V.

7. SCARICATORI IN OSSIDO METALLICO PER SISTEMI DI POTENZA IN ALTA TENSIONE

7.1 PRINCIPI OPERATIVI

Gli scaricatori sono un aiuto indispensabile per il coordinamento dell'isolamento nei sistemi elettrici di potenza. Si prenda in considerazione il valore di una sovratensione in funzione della sua durata (come mostrato in fig. 7.1).

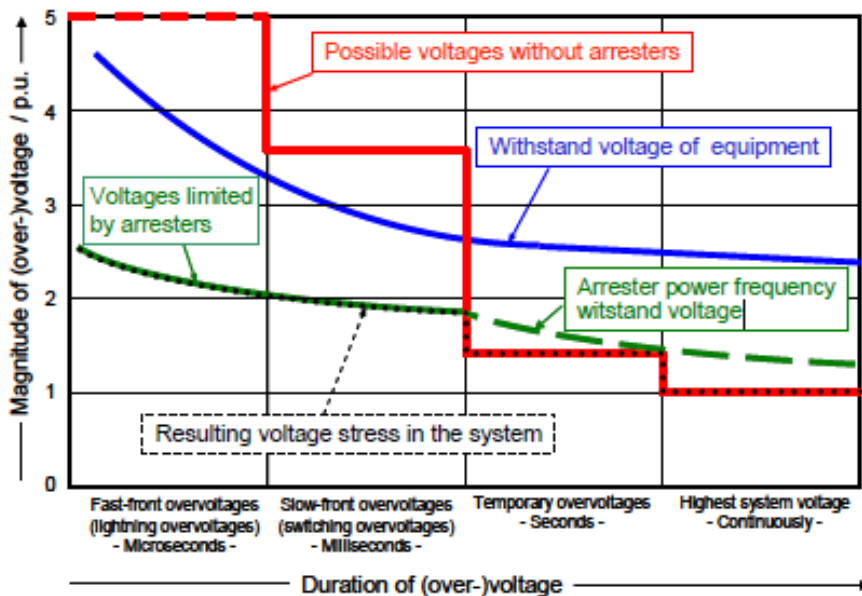


Fig. 7.1 - Rappresentazione schematica di una sovratensione (fase-terra) in funzione della durata per un sistema elettrico di potenza in alta tensione.

L'asse delle ascisse, che rappresenta la durata delle possibili sovratensioni, è divisa in sovratensioni a fronte veloce (fulminazione), a fronte lento (dovute alle operazioni di manovra del sistema elettrico) e temporanee, infine viene mostrato il valore massimo di tensione del sistema. Il valore che la tensione può raggiungere senza l'utilizzo di scaricatori, arriva a molti p.u. di quello nominale. Si nota che il valore di tensione che l'apparecchiatura può sostenere sarebbe inferiore ed essa cedrebbe allo stress dielettrico. A questo punto deve intervenire lo scaricatore che, mantenendo un margine di sicurezza, trattiene i valori di tensione a livelli accettabili per il sistema elettrico.

Gli scaricatori che vengono installati al giorno d'oggi sono quasi tutti costituiti da resistori in ossido metallico, la cui caratteristica distintiva è la curva tensione-corrente (U-I) estremamente non lineare. La corrente che passa attraverso lo scaricatore entro l'intervallo di tensione in condizioni operative nominali è di valore così piccolo che esso si comporta come un isolante. Ma se viene iniettata in rete una corrente di fulminazione dell'ordine dei

kA, lo scaricatore assorbe quella corrente mantenendo la tensione ai capi dei dispositivi associati a livelli sostenibili.

Tuttavia esistono tre cause significative che possono portare la tensione ai capi dei dispositivi da proteggere a valori elevati:

- **Processi di onda viaggiante:** A causa di un aumento repentino della tensione sottoforma di onda viaggiante, nei punti in cui l'impedenza della linea cambia possono verificarsi fenomeni di rifrazione e riflessione. Il livello di tensione in ogni istante e in ogni punto della linea è la risultante della somma dei diversi contributi di ogni singola onda. Quindi può succedere che in una terminazione della linea il valore venga duplicato. È di importanza vitale la distanza alla quale viene inserito lo scaricatore, poiché esso definisce solamente una zona di protezione locale limitata.
- **Cadute di tensione di tipo induttivo:** La caduta di tensione dovuta all'induttanza di un conduttore può essere calcolata secondo la formula: $u = L \times di/dt$, assumendo come valori medi tipici, in caso di corrente di fulminazione, un'induttanza di 10 μH e una derivata di corrente di 10 $\text{kA}/\mu\text{s}$, la tensione può raggiungere i 100 kV, che può superare facilmente il livello di tensione residua dello scaricatore.
- **Correnti di scarica maggiori della corrente di scarica nominale dello scaricatore:** Nel caso in cui nello scaricatore arrivino valori di corrente che superano il livello di scarica nominale, esso può resistere alla scarica senza danneggiarsi, ma con il risultato di un aumento di tensione residua ai suoi terminali, dipendente dalla forma della caratteristica U-I (un aumento dal 5% al 15% per una corrente doppia).

Quindi, per la scelta del livello di protezione di uno scaricatore, vanno considerati certi dettagli, come per esempio la distanza dal dispositivo che deve essere protetto, la configurazione specifica della sottostazione elettrica o il tipo di stress dielettrico nel sistema. In casi problematici, dove possono verificarsi sovratensioni con fronte molto veloce, o dove è presente una grande distanza tra lo scaricatore e il dispositivo da proteggere, il livello di protezione deve essere calcolato specificatamente attraverso calcoli appositi, come previsto in normativa IEC 60071-2 (Coordinamento dell'isolamento – linee guida per l'applicazione) e IEC 60099-5 (Scaricatori – raccomandazioni per la selezione e l'applicazione).

Inoltre uno scaricatore deve possedere la necessaria capacità di gestione dell'energia per ogni singola applicazione. Vanno considerati due aspetti:

- L'energia che viene iniettata istantaneamente durante una singola scarica non deve superare il livello al quale il resistore in ossido metallico viene termomeccanicamente stressato oltre il limite. La temperatura iniettata in tempi così brevi (dell'ordine dei μs o ms) causa un estremo aumento della temperatura con conseguente creazione di forze all'interno del resistore ceramico. Questo può causare delle crepe nel materiale o in casi più gravi anche la rottura dello stesso. La capacità

di gestione dell'energia è un parametro caratteristico del resistore a ossidi metallici ed è solitamente specificato dal costruttore con un margine di sicurezza.

- Diversa è invece la capacità dello scaricatore di gestire l'energia termica, definita come il massimo livello di energia iniettato nell'oggetto, alla quale esso può ancora ritornare alla normale temperatura di esercizio. Le perdite di energia che si hanno durante il normale funzionamento sono dipendenti dalla temperatura e crescono più che proporzionalmente con l'aumento della stessa. Lo scaricatore, d'altro canto, può dissipare una quota limitata di calore, poiché anche la dissipazione di calore cresce con la temperatura ma non quanto le perdite. Le due curve energetiche hanno due punti di intersezione: il primo corrisponde alla stabilità termica, il secondo invece corrisponde al limite massimo di temperatura che lo scaricatore può raggiungere, in caso di sovratensioni, essendo in grado di ritornare alla situazione di equilibrio. Se quel punto venisse superato, il raffreddamento non sarebbe più possibile e lo scaricatore diventerebbe termicamente instabile fino alla sua distruzione. Il limite termico di stabilità dipende dalle caratteristiche dell'oggetto e dal suo design, e ha valori solitamente compresi tra i 190 °C e i 220 °C.

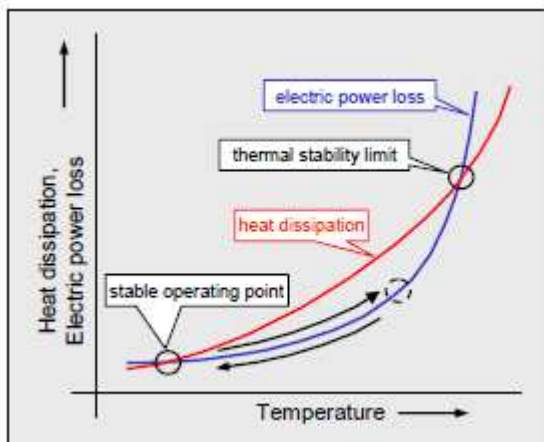


Fig. 7.2 – Principio della stabilità termica. Sono rappresentate le curve di dissipazione di calore e della perdita di energia in funzione della temperatura. Le intersezioni definiscono il punto di stabilità e il punto limite.

Bisogna inoltre notare che normalmente gli scaricatori sono progettati per deviare verso terra solo una frazione della carica introdotta nei conduttori delle linee aeree in seguito ad una fulminazione. In questo caso è usuale che si creino dei percorsi conduttivi negli isolatori delle linee, e gran parte della carica viene scaricata a terra attraverso questi ultimi. Solo le sovratensioni limitate dagli isolatori e le relative correnti di scarica associate all'impedenza della linea raggiungono infine le stazioni elettriche, e solo queste devono essere poi limitate dagli scaricatori nelle stazioni per proteggere eventuali trasformatori e il piazzale stesso. Nei sistemi di distribuzione in media tensione gli scaricatori sono ampiamente diffusi nella rete elettrica, quindi se un fulmine colpisce troppo vicino ad essi è possibile che gli isolatori non lo percepiscano affatto. Questo fenomeno è una causa comune di guasto per il sistema. Per evitare questo inconveniente nelle linee di trasmissione, viene spesso migliorato il sistema di

schermatura installando, per esempio, un secondo cavo aereo schermato nei pressi della stazione. Per questa ragione gli effetti della fulminazione nelle dirette vicinanze degli scaricatori sono meno comuni nelle linee ad alta tensione, rispetto a quelle di distribuzione.

7.2 PROGETTAZIONE DEGLI SCARICATORI IN OSSIDO METALLICO

Esistono diversi tipi di design costruttivi per realizzazione di scaricatori in ossido metallico, ma saranno riportati solo alcuni esempi per mostrarne il principio base. È bene notare che i moderni stili di progettazione non necessitano di spazi vuoti in serie, che erano obbligatori per gli scaricatori in carburo di silicio (SiC), rendendone la realizzazione molto più semplice. Gli scaricatori in ossido metallico, infatti, sono costruiti con un solo elemento attivo effettivo, ossia la colonna di resistori in ossido metallico. Alla colonna di resistori sono richieste molte funzioni che prima venivano condivise con gli altri componenti dello scaricatore. I resistori devono resistere all'invecchiamento subendo costantemente la tensione nominale di esercizio, devono essere in grado di assorbire l'energia che gli viene iniettata e deviare la carica accumulata, limitando conseguentemente la corrente di scarica a livelli accettabili per mantenere la stabilità termica del sistema. Di conseguenza, la realizzazione manifatturiera dei resistori in ossido metallico, che risulta essere molto più complicata di quelli in SiC, assume una grande importanza.

Un primo esempio di progettazione riguarda gli scaricatori con struttura in porcellana, per i sistemi in alta tensione. La colonna del resistore in ossido metallico costituisce, insieme al supporto meccanico, la parte attiva dello scaricatore, ed è formato da una serie di resistori impilati uno sopra l'altro. I resistori sono solitamente di forma cilindrica e il loro diametro determina la loro gestione dell'energia, la capacità di trasportare corrente e il livello di protezione: da 30 mm per i sistemi di distribuzione, fino a 100 mm per sistemi a tensione molto elevata o in applicazioni speciali in cui è richiesta una gestione di energia specifica. Il diametro è il parametro più importante perché la lunghezza delle colonne è quasi sempre definita per ogni livello di protezione. In alcuni casi particolari, le parti attive possono essere realizzate con due o tre colonne connesse in parallelo.



Fig. 7.3 – Resistori in ossido metallico di varie dimensioni.

La caratteristica U-I del resistore, o dello scaricatore completo, è basata sulla caratteristica E-J (Intensità del campo elettrico in funzione della densità di corrente) del materiale sottostante. Si può calcolare facilmente moltiplicando la densità del campo elettrico con la relativa altezza e la densità di corrente con la relativa sezione. Il valore di tensione residua per millimetro di altezza durante un impulso di corrente da 10 kA di picco è compreso tra i 450 V/mm per un resistore da 32 mm di diametro e 330 V/mm per un resistore da 100 mm di diametro. Con un'altezza standard di 36 mm e una tensione residua di 360 V/mm, ogni singolo resistore ha una tensione residua di circa 13 kV. Per raggiungere livelli di protezione per impulsi di fulminazione di 800 kV, per esempio, sono necessari 62 resistori in serie, con un'altezza della colonna risultante di 2.2 m, che può essere contenuta in un singolo involucro di porcellana. Tuttavia, per ragioni dielettriche, l'involucro deve essere progettato per essere molto lungo, quindi in reti di alta tensione vengono tipicamente installate due unità in serie. La lunghezza dello scaricatore non è dunque determinata dalla parte attiva dello stesso. La lunghezza della parte attiva è adattata a quello dell'involucro attraverso degli spaziatori metallici, che hanno la funzione di mantenere una pressione di contatto adeguata e, in alcuni casi, di aumentare la capacità di gestione di energia termica dello scaricatore.

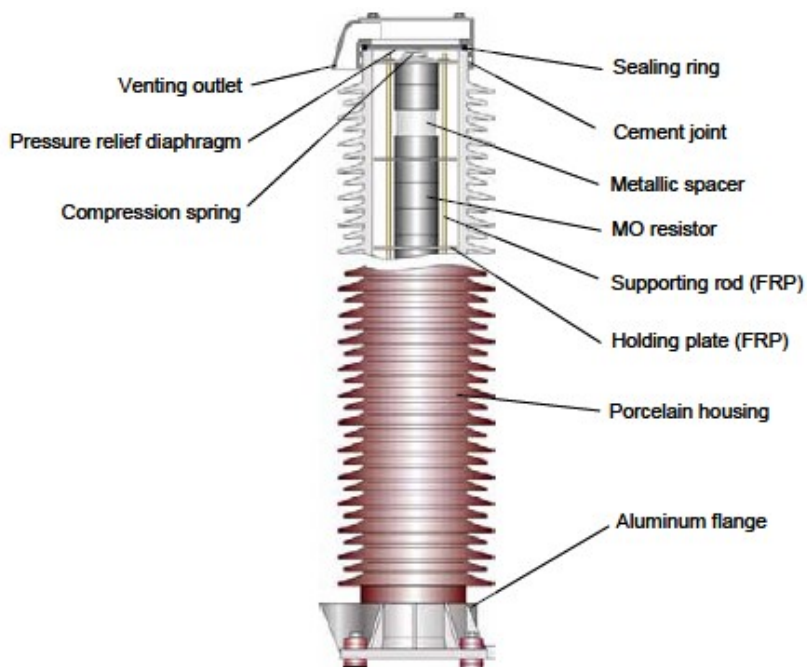


Fig. 7.4 – Sezione di uno scaricatore in ossido metallico con involucro di porcellana.

I resistori impilati uno sopra l'altro devono essere meccanicamente ancorati all'involucro, con lo scopo di assicurare che la parte attiva non si sposti dalla sua posizione originaria durante il trasporto o l'installazione. D'altra parte è necessaria una certa pressione di contatto assiale in modo da gestire meglio gli stress dovuti alle correnti. A tal fine sono inserite parecchie aste di supporto in FRP (materiali fibrorinforzati a matrice polimerica), intervallate da piatte di sostegno dello stesso materiale. Una forte molla di compressione (in alcuni casi

anche più di una) attaccata alla parte superiore della colonna mantiene la parte attiva sollevata dall'involucro. Quasi tutti gli scaricatori moderni sono inoltre provvisti di una flangia di giunzione in alluminio (o, in casi specifici, in acciaio) alla base dell'involucro, che viene fissata con del cemento. La parte superiore dell'involucro, oltre a proteggere la parte attiva dagli eventi atmosferici, deve garantire un'adeguata distanza di dispersione; per questo motivo è equipaggiata con delle coperture (*sheds*) il cui profilo può essere di varie forme. Infine, uno dei componenti più critico dello scaricatore è il sistema di tenuta (*sealing system*); esso ha tre compiti: deve impedire l'ingresso di umidità nello scaricatore per tutta la sua durata di vita, deve limitarne la pressione in caso di eventuali sovraccarichi che potrebbero distruggere la porcellana, deve definire il trasferimento di corrente elettrica dalla flangia alla colonna di resistori.

Nel caso di scaricatori di lunghezze elevate, o in caso siano messe in serie più unità, è essenziale che siano forniti di anelli di livellamento (*grading ring*) che servono a controllare la distribuzione della tensione dal terminale di alta tensione fino a terra, poiché tale distribuzione è fortemente influenzata dalle capacità verso terra dello scaricatore. È molto importante mantenere la distribuzione di tensione corretta al fine di evitare instabilità termiche che porterebbero al guasto dell'impianto. Il sistema è anche solitamente dotato di una base isolante per il collegamento a terra, che può essere utilizzata per il monitoraggio del dispositivo stesso.

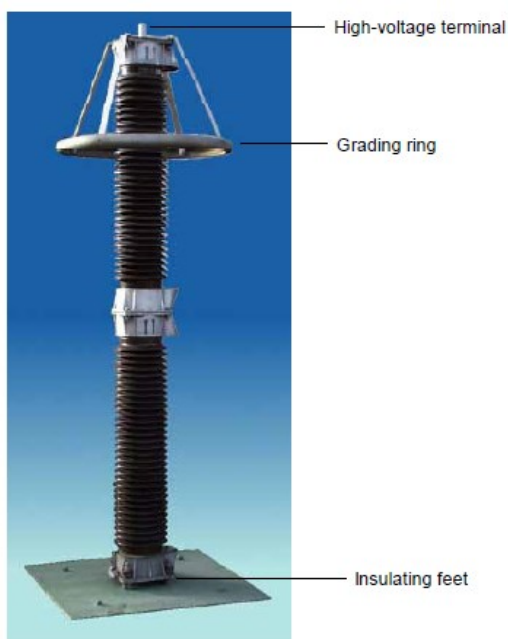


Fig. 7.5 – Scaricatore per alta tensione formato da due unità sovrapposte, dotato di anello di livellamento e base isolante.

Un altro tipo di scaricatore è quello realizzato in materiale polimerico, che viene usato, in base alle specifiche di progettazione, sia in reti ad alta tensione sia in quelle a media tensione. La caratteristica principale di questi prodotti è che l'involucro in polimeri è localizzato direttamente sulla pila di resistori, di conseguenza non è più presente un vuoto riempito in

gas tra questi ultimi, rendendo superfluo qualsiasi sistema di tenuta. Allo stesso modo, in caso di sovraccarico, viene evitato un sovraccarico di pressione che rischia di rompere la struttura del sistema. A differenza degli scaricatori in porcellana, che contenevano diverse proprietà all'interno dello stesso componente, quelli in polimeri necessitano di diverse parti specifiche. La resistenza meccanica è assicurata con dei materiali in plastica fibrorinforzata (FRP). È poi presente una gomma in silicone, che ha il vantaggio di essere un materiale molto resistente e duraturo. Il silicone inoltre ha un'ottima proprietà idrofobica, che lo rende facilmente lavabile, anche quando si trova in ambienti molto inquinati, migliorando notevolmente le prestazioni dello scaricatore. In aggiunta, l'involucro polimerico elimina eventuali rischi di incendio e rottura in caso di sovraccarichi: l'arco elettrico che si creerebbe all'interno della gomma, infatti, trova il modo di scaricarsi all'esterno senza trovare resistenza nel materiale. Tutti questi vantaggi, insieme alla riduzione del peso e dei costi, rispetto alla struttura in porcellana, ha reso i materiali polimerici molto più utilizzati negli ultimi anni.

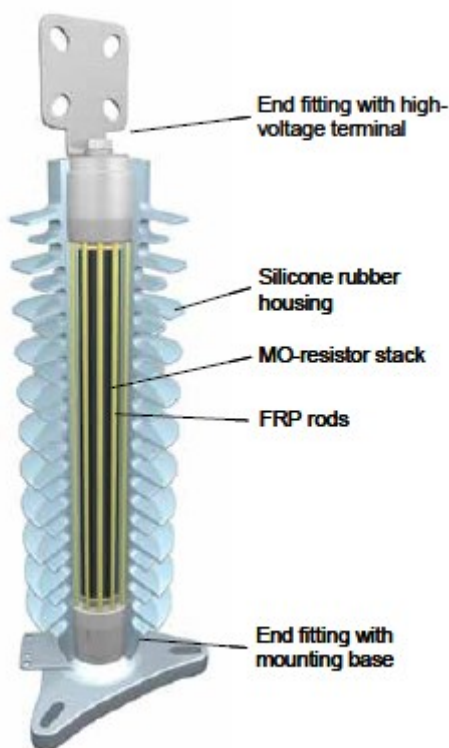


Fig. 7.6 – Sezione di uno scaricatore a ossidi metallici, con struttura in materiale polimerico.

7.3 CONFIGURAZIONE DEGLI SCARICATORI IN OSSIDO METALLICO

Per configurare uno scaricatore è necessario conoscere come i diversi parametri e requisiti del sistema influenzano le prestazioni dell'oggetto. Gli standard internazionali si riferiscono alle norme IEC 60099-4 (*Surge arresters - Part 4: Metal-oxide surge arresters without gaps for a.c. systems*) e IEC 60099-5 (*Surge arresters - Part 5: Selection and application recommendations*). I requisiti fondamentali per uno scaricatore sono due: da un lato deve

prevedere un'adeguata protezione al sistema, questo significa che le sovratensioni che arrivano sul dispositivo devono sempre essere minori della tensione di tenuta, con un determinato margine di sicurezza; dall'altro lato lo scaricatore deve essere in grado di operare in condizioni di esercizio per un lungo periodo di vita, rimanendo elettricamente e termicamente stabile. I due requisiti base non possono essere soddisfatti indipendentemente, in quanto una riduzione del livello di protezione comporterebbe uno stress elettrico maggiore e, viceversa, la tensione di esercizio di uno scaricatore non potrebbe essere aumentata senza elevare il suo livello di protezione. Un ulteriore requisito è che durante il loro ciclo di vita, gli scaricatori non devono modificare le loro caratteristiche e devono essere insensibili alle influenze dell'ambiente circostante, come inquinamento, radiazione solare e sforzi meccanici.

Il primo parametro da definire è la minima tensione continua di esercizio $U_{c,min}$. Questa deve essere superiore alla tensione tra fase e terra del sistema, con almeno un ulteriore 5% di margine, per tenere conto delle possibili armoniche nel sistema che possono aumentare il valore di picco della tensione. Per determinare la tensione continua di esercizio è importante conoscere il metodo di messa a terra del neutro: in caso di sistemi con messa a terra del neutro isolato o risonante, la tensione della fase sana verso terra assume il valore della tensione concatenata in caso di guasto monofase-terra, quindi la tensione minima dello scaricatore assume il valore della più alta tensione del sistema U_s e in questo caso non viene preso in considerazione l'ulteriore 5%.

$$\begin{aligned} \text{Neutro con messa a terra solida: } U_{c,min} &\geq 1.05 \times \frac{U_s}{\sqrt{3}} \\ \text{Neutro isolato o risonante: } U_{c,min} &\geq U_s \end{aligned}$$

Una volta ricavata la tensione continua minima di esercizio, solitamente viene moltiplicata per un fattore 1.25 (valore puramente empirico) e si ottiene la minima tensione nominale necessaria U_{r1} , che tuttavia non è quella finale. Tuttavia la tensione nominale può anche essere calcolata esaminando le sovratensioni temporanee nel sistema: nei casi di messa a terra solida le sovratensioni possono infatti raggiungere valori di picco che superano di 1.4 volte la massima tensione tra fase e terra, per un periodo di pochi decimi di secondo fino a svariati secondi. Attraverso la caratteristica U-t vengono messi in correlazione il rapporto k_{tov} (*temporary over voltage*) tra la tensione applicata al sistema alla frequenza di rete e la tensione nominale U_r , in valore efficace, e la durata della sovratensione, in secondi. Si assume che lo scaricatore lavori ad una temperatura di 60 °C. La tensione nominale viene calcolata in generale come:

$$U_{r2} = U_{tov}/K_{tov}$$

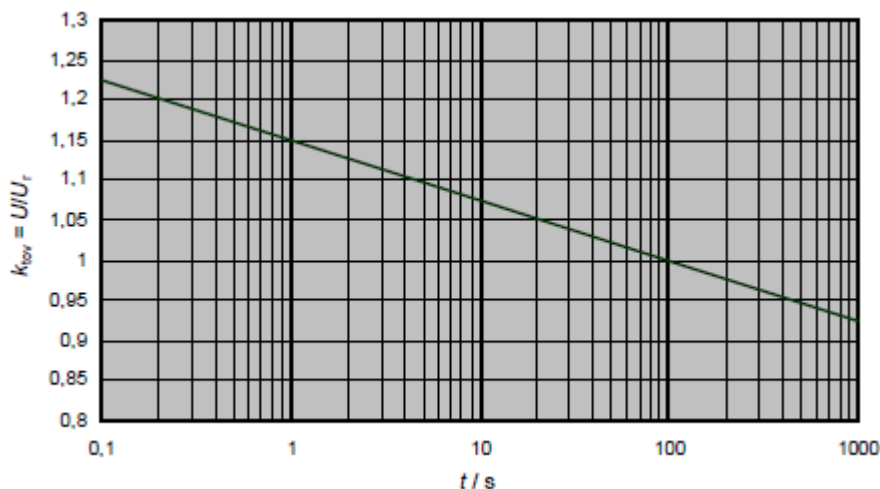


Fig. 7.7 – Esempio di una caratteristica U-t, in scala logaritmica.

La tensione nominale finale è ottenuta scegliendo il valore massimo tra U_{r1} e U_{r2} , arrotondata per eccesso al successivo valore divisibile per 3, secondo quanto richiesto in normativa.

$$U_r = \max \{U_{r1}, U_{r2}\}$$

Il prossimo parametro da considerare è la corrente nominale di scarica I_n . Dal punto di vista tecnico è ricavata a partire da una tipica corrente massima di scarica I_{max} che ci si può aspettare nella sottostazione. Questo valore viene calcolato attraverso tre parametri: la tensione di scarica degli isolatori di linea U_{fo} (*flashover voltage*), il livello di protezione degli scaricatori U_{pl} (*lightning protection level*) e l'impedenza caratteristica della linea Z .

$$I_{max} = \frac{2 \times U_{fo} - U_{pl}}{Z}$$

Il fattore due nella formula è dovuto alla teoria delle onde viaggianti, secondo cui la tensione di fulminazione quando raggiunge la sottostazione raddoppia il suo valore nello scaricatore, poiché è visto come se fosse equivalente ad una terminazione di linea in corto circuito (con un generatore di tensione costante in serie). All'interno della norma IEC 60099-4 sono specificati i valori di corrente nominale di scarica associati ai vari livelli di tensione nominale della rete elettrica. Ad ogni modo i valori che vengono suggeriti non rivelano direttamente tutte le caratteristiche del sistema, ma servono come base di partenza per ulteriori test riguardanti i requisiti operativi necessari, a seconda della classe dell'apparecchiatura.

Altra caratteristica essenziale per la configurazione dello scaricatore ad alta tensione, è la classe di scarica. Attualmente è l'unico modo per specificare la capacità di gestione di energia dello scaricatore, in accordo con la norma IEC 60099-4. La definizione della classe di scarica si basa sul presupposto che una linea di trasmissione lunga, investita da una certa sovratensione in seguito ad una manovra della rete, scaricherà attraverso uno scaricatore connesso alla linea, sottoforma di un'onda viaggiante. La corrente di scarica arriverà ad un

valore determinato dal valore di tensione e dell'impedenza caratteristica della linea, per una durata legata alla lunghezza della linea e alla velocità di propagazione dell'onda elettromagnetica. La prova può essere svolta in un laboratorio attraverso l'utilizzo di un generatore di impulsi costanti. La norma IEC 60099-4 definisce cinque diverse classi.

Classe di scarica	Impedenza caratteristica di linea Z [Ω]	Durata T [μ s]	Livello di Sovratensione U_L [kV] (c.c.)
1	$4.9 U_r$	2000	$3.2 U_r$
2	$2.4 U_r$	2000	$3.2 U_r$
3	$1.3 U_r$	2400	$2.8 U_r$
4	$0.8 U_r$	2800	$2.6 U_r$
5	$0.5 U_r$	3200	$2.4 U_r$

Tab. 7.1 – Classi di scarica e parametri di prova associati (U_r : Tensione nominale dell'onda di prova in kV r.m.s.).

La norma fornisce un diagramma che rappresenta l'energia specifica nell'oggetto di prova, riferita alla sua tensione nominale, che viene liberata durante una singola scarica. Questa energia non è un valore fissato, ma dipende dal livello di protezione dello scaricatore, o più precisamente, dalla sua tensione residua U_{res} . Più quest'ultima è elevata, minore sarà l'energia assorbita durante la scarica.

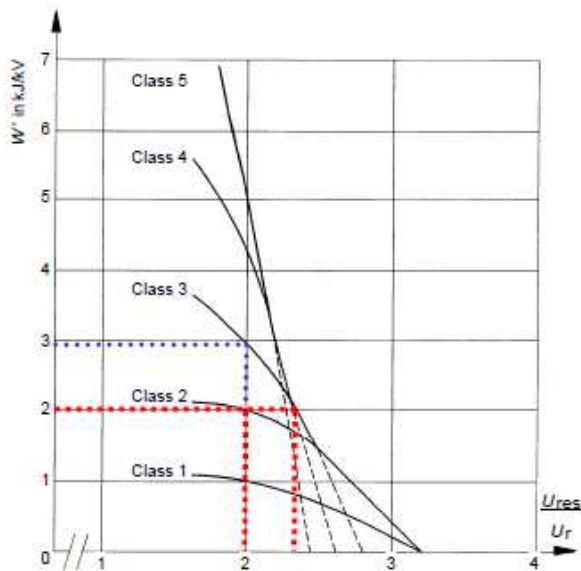


Fig.7.8 – Energia specifica in funzione della tensione residua dell'oggetto di prova, per ognuna delle cinque diverse classi di scarica.

Inoltre, quando non sono ci sono requisiti particolari da soddisfare, la norma IEC 60099-5 suggerisce la classe di scarica a partire dalla tensione del sistema.

Classe di scarica	Tensione del sistema [kV]
1	≤ 245
2	≤ 300
3	≤ 420
4	≤ 550
5	≤ 800

Tab. 7.2 – Valori di guida per le classi di scarica in funzione della tensione del sistema.

Infine, a seconda della classe di scarica assegnata, è possibile avere automaticamente un'indicazione tipica per la misura del diametro dei resistori in ossido metallico dello scaricatore.

Diametro resistori [mm]	Classe di scarica
50	1-2
60	2-3
70	3-4
80	4-5
100 (o 2×70 in parallelo)	≥ 5

Tab. 7.3 – Valori di guida per il diametro dei resistori in funzione della classe di scarica.

Una volta determinata la tensione nominale e conseguentemente il diametro dei resistori, la caratteristica di protezione dello scaricatore è completamente stabilita. Tutti i valori di tensione residua si ottengono dalla caratteristica U-I del tipo di resistore selezionato. Il passo successivo consiste nel verificare che la caratteristica di protezione ottenuta sia adeguata. La caratteristica di protezione di uno scaricatore è solitamente valutata attraverso il livello di protezione agli impulsi di fulminazione, ossia attraverso la sua tensione residua mentre sta scorrendo la corrente nominale di scarica. Bisogna tenere conto che è anche possibile che la

corrente di scarica possa superare il suo valore nominale, poiché a causa del comportamento delle onde viaggianti e delle cadute di tensione induttive in rete, la sovratensione ai capi del dispositivo da proteggere può superare quella ai terminali dello scaricatore. La normativa, comunque, suggerisce la procedura standard corretta per determinare le sovratensioni previste, e quindi il livello di protezione necessario, attraverso i calcoli e gli studi sul coordinamento dell'isolamento. Informazioni e istruzioni su questo tema possono essere trovate nelle pubblicazioni IEC 60071-1 (*Insulation co-ordination – Part 1: Definitions, principles and rules*) e 60071-2 (*Insulation co-ordination - Part 2: Application guidelines*).

Nei sistemi a tensione molto alta, la caratteristica protettiva di uno scaricatore viene normalmente determinata a partire dal livello di protezione dagli impulsi di manovra. La classe viene generalmente definita per due diversi valori di impulsi di manovra, secondo la norma IEC-standard 60099-4.

Classe dello scaricatore	Impulsi di manovra [A]
20 kA, classi 4 e 5	500/2000
10 kA, classe 3	250/1000
10 kA, classi 1 e 2	125/500

Tab. 7.4 – Correlazione tra classe dello scaricatore e impulsi di manovra nella rete.

Per quanto riguarda la selezione dell'alloggiamento vengono solitamente presi in considerazione i requisiti dielettrici e meccanici. Devono essere determinati la lunghezza, la distanza di dispersione, il profilo dell'involucro, il diametro e il tipo di materiale. Le caratteristiche dello scaricatore determinate dall'alloggiamento sono la corrente di cortocircuito nominale (I_s), il carico a lungo termine specificato (*specified long-term load*, SLL) e il carico a breve termine specificato (*specified short-term load*, SSL).

La minima lunghezza dipende ovviamente dalla dimensione della parte attiva, ossia la colonna di resistori; tuttavia normalmente non è sufficiente per i criteri di dimensionamento. Spesso, infatti, la lunghezza dell'alloggiamento è molto più grande della parte attiva. Uno dei parametri che definisce il dimensionamento è lo spazio libero necessario (*clearance*) che dipende dalla tensione di tenuta per l'isolamento dell'oggetto. Un'altra ragione per l'allungamento dell'involucro è, appunto, la distanza di dispersione; normalmente deve essere garantita una distanza di dispersione specifica di 20 mm/kV, definita per un livello di inquinamento medio. Inoltre alcuni tipi di materiale possono consentire di ridurre la distanza di dispersione; ad esempio, negli scaricatori in polimeri, dove possono essere utilizzate coperture in silicone che hanno una buona proprietà idrofobica, la distanza di dispersione potrebbe essere circa 80% rispetto ad uno scaricatore equivalente in porcellana. Tuttavia in pratica questo non viene applicato poiché la caratteristica idrofobica del materiale potrebbe

non essere più garantita sotto alcune condizione operative (per esempio l'esposizione costante all'umidità per un lungo periodo).

Una volta elencati i parametri dielettrici, il passo successivo consiste nel definire i criteri meccanici. Essi portano indirettamente alla scelta del materiale e del diametro dell'alloggiamento. Spesso c'è solo una vaga idea riguardo lo stress meccanico che subisce uno scaricatore in servizio, per cui, se non ci sono abbastanza informazioni disponibili sulle specifiche richieste, vengono forniti dei valori come linee guida per determinare il carico statico nei sistemi ad alta tensione. Tali valori rappresentano i requisiti minimi per uno scaricatore che opera in condizioni normali di servizio.

Oltre al carico statico, che solitamente non comporta grossi problemi per il dispositivo, devono essere considerati gli sforzi dinamici, che possono essere causati da correnti di cortocircuito o da un forte vento. In questo caso gli scaricatori con alloggiamento in porcellana possono, a causa delle proprietà fragili e del comportamento statistico del materiale, essere sottoposti solo fino al 40% della loro forza dinamica. La IEC ha rimpiazzato il termine di carico statico con carico a lungo termine specificato (SLL), e quello dinamico con carico a breve termine specificato (SSL), inoltre ha introdotto l'acronimo MBL per definire il carico medio di rottura (*mean breaking load*).

Tensione massima del sistema U_s [kV]	SLL [N]	SSL [N]	MBL [N]
< 123	350	875	≥ 1050
123÷420	400	1000	≥ 1200
550	600	1500	≥ 1800
800	800	2000	≥ 2400

Tab 7.5 – Caratteristica meccanica raccomandata per scaricatori in porcellana.

I rapporti sembrano leggermente diversi per gli scaricatori con alloggiamento in polimero. Tuttavia, non sono ancora state stabilite regole e standard specifici a causa dei molti design diversi possibili e dell'insufficiente esperienza di vita reale. In ogni caso si può affermare che mediamente l'involucro in polimero si discosta poco dalle sue caratteristiche meccaniche normali e che quindi può sopportare un maggior carico.

In alcune regioni del mondo devono anche essere presi in considerazione i requisiti sismici. Questi requisiti devono essere specificati esplicitamente nella progettazione poiché da essi deriva un enorme aumento dei valori di carico visti in Tab. 7.5. Esistono diversi calcoli standardizzati e procedure di prova che determinano il comportamento di uno scaricatore in

tali condizioni. Tipicamente uno scaricatore completamente assemblato viene sottoposto a una prova sismica su una tavola vibrante, sulla quale vengono accelerati almeno due, o preferibilmente tre, assi contemporaneamente. Queste condizioni estreme sono più facilmente soddisfatte attraverso l'utilizzo di materiale polimerico, invece di quello in porcellana.



Fig. 7.9 – Scaricatore in polimeri per un sistema a 550 kV, durante una prova sismica su tavola vibrante.

Tuttavia, la caratteristica meccanica più importante, che deve sempre essere presa in considerazione, è la capacità di tenuta alle correnti di cortocircuito. Il sovraccarico può avvenire, per esempio, a causa di una fulminazione diretta sul sistema di distribuzione o di un guasto in un conduttore, e porta allo sviluppo di un arco all'interno dell'alloggiamento dello scaricatore, attraverso il quale scorre la corrente di guasto. Se è presente un volume di gas interno, la pressione cresce istantaneamente ed è necessario l'utilizzo di un dispositivo apposito per evitare che la struttura esploda. Comunque i nuovi scaricatori isolati in polimeri solitamente non contengono un volume interno di gas, quindi lo scopo delle prove di tenuta è quello di verificare che, in caso di sovraccarico, secondo le specifiche richieste, l'involucro dello scaricatore rimanga intatto o che, anche in caso di rottura, i frammenti di materiali cadano nel terreno all'interno di una circonferenza delimitata.

La massima corrente di cortocircuito, che scorre per un periodo di 200 ms, è la corrente di cortocircuito nominale di tenuta I_s . La norma IEC 60099-4 definisce i valori di prova a cui gli oggetti devono sottostare a seconda dell'impianto elettrico in cui vengono installati. I test standard prevedono che la prova venga eseguita con la totale corrente di cortocircuito, in modo tale che sia sovrapposta con una componente in c.c. in decadimento; ciò significa che la corrente deve arrivare al suo valore di picco, ossia due volte e mezzo il valore nominale.

Oltre alla corrente di cortocircuito nominale, vengono eseguite anche delle prove con una corrente di cortocircuito di 50% e 25% di quella nominale, poiché occasionalmente è stato osservato nella pratica che l'alloggiamento dello scaricatore può distruggersi a correnti di cortocircuito inferiori al massimo specificato, questo perché i dispositivi di limitazione della pressione sono stati ottimizzati solo per il caso estremo e hanno reagito troppo lentamente a correnti inferiori. Infine, la prova deve essere eseguita anche con una "corrente di cortocircuito bassa" di valore standard ($600 \text{ A} \pm 200 \text{ A}$). Questa corrente scorre per la durata di un secondo, ed entro questo tempo i dispositivi di limitazione della pressione (se presenti nel design) devono essere aperti. Questa parte del test viene eseguita per dimostrare che tali dispositivi possono aprirsi anche in condizioni di corrente di guasto molto bassa.

Corrente di cortocircuito nominale (200 ms) [kA]	Corrente di cortocircuito ridotta (200 ms) [kA]		Corrente di cortocircuito bassa (1 s) [A]
80	50	25	600 ± 200
63	25	12	
50	25	12	
40	25	12	
31.5	12	6	
20	12	6	
16	6	3	
10	6	3	
5	3	1.5	

Tab. 7.6 – Correnti per i test di cortocircuito.

La capacità di tenuta alle correnti di cortocircuito viene testata sull'unità più lunga di un determinato tipo, questo perché essa è influenzata dai parametri dello scaricatore, quali il diametro, la lunghezza e il tipo di materiale dell'alloggiamento e lo spessore delle pareti; più lungo è l'oggetto minore sarà la sua resistenza, mentre diametri e spessori elevati consentono una resistenza maggiore.



Fig. 7.10 – Scaricatore in porcellana dopo un test ad una corrente di cortocircuito nominale di 63 kA (durata di 200 ms). L'alloggiamento è rimasto pressoché intatto.

È bene ricordare che le caratteristiche di ogni scaricatore vengono determinate alle condizioni normali di servizio dal costruttore. Quindi, al momento della scelta dell'oggetto, è necessario controllare che queste condizioni siano effettivamente valide per il luogo di installazione. Di seguito sono riportate le condizioni normali di servizio trovate all'interno della norma IEC 60099-4:

- Temperatura ambiente dell'aria tra -40°C e $+40^{\circ}\text{C}$.
- Radiazione solare di 1.1 kW/m^2 .
- Altitudine non superiore a 1000 m sul livello del mare.
- Frequenza di rete compresa tra 48 Hz e 62 Hz.
- Tensione applicata costantemente ai terminali dello scaricatore non superiore alla sua tensione continua di funzionamento.
- Velocità del vento inferiore a 34 m/s.
- Scaricatore installato in modo verticale al terreno.

8. UNA NUOVA TECNICA PER IL MONITORAGGIO BASATA SULLA CORRENTE RESISTIVA DI QUINTA ARMONICA

Dal momento che ogni danno o malfunzionamento subito dagli scaricatori di tensione comporta direttamente un disservizio per gli altri apparecchi elettronici collegati in rete, risulta essere di vitale importanza assicurare la loro corretta funzionalità. Tipicamente sono l'invecchiamento e il degrado dell'isolamento le cause più comuni per il malfunzionamento dell'oggetto in esame. Fino ad ora sono state proposte numerose tecniche per il monitoraggio delle condizioni degli scaricatori, quali il metodo di misura della tensione residua, misura delle perdite di potenza, analisi della curva tensione-corrente, misura della corrente di dispersione o monitoraggio della temperatura. Attraverso l'utilizzo di sensori di corrente ad alta accuratezza, il metodo di misura delle correnti di dispersione risulta essere quello più efficace. La totale corrente di dispersione può essere espressa come somma dei fasori di due componenti, resistiva e capacitiva.

$$I_T = I_R + I_C$$

La corrente capacitiva è legata alla capacità e alla permittività dell'ossido metallico, dunque non è interessata dalle anomalie del funzionamento dello scaricatore o dei parametri ambientali. D'altro canto, la componente resistiva dipende dalla caratteristica V-I, dalla tensione applicata e dalla temperatura dell'ambiente, quindi risulta essere più sensibile al malfunzionamento e al degrado dello scaricatore. Attualmente in letteratura viene mostrata come la variazione della componente di terza armonica della corrente resistiva I_{R3rd} , a causa di invecchiamento e degrado, sia più marcato rispetto al cambiamento della corrente di dispersione totale. Tuttavia la componente di terza armonica è anche influenzata dalle armoniche della tensione di rete, per questo motivo l'aumento della corrente I_{R3rd} non è sempre un'indicazione accurata dell'invecchiamento dello scaricatore, specialmente se la rete è contaminata dalla terza armonica di tensione V_{3rd} .

In un articolo del 2021, scritto da Abdullah Munir, Zulkurnain Abdul-Malek, Umbrin Sultana, Rai Naveed Arshad, viene proposto il metodo di misura della componente resistiva di quinta armonica I_{R5th} per valutare l'invecchiamento degli scaricatori in ossido metallico. La sperimentazione ha mostrato come la variazione della I_{R5th} rispetto alla corrispondente V_{5th} , risulti essere minore della variazione della I_{R3rd} rispetto alla corrispondente V_{3rd} . Sono stati studiati cinque vecchi campioni di scaricatori in materiale polimerico con una tensione nominale di 120 kV e attraverso dei sensori di corrente è stata misurata la totale corrente di dispersione, da cui infine è stata estratta la componente resistiva. Le sperimentazioni si sono svolte nel laboratorio di alta tensione della *University of Technology Malaysia (UTM)*. Sono state utilizzate due sorgenti di bassa tensione variabile tra 0 e 240 V, per simulare le armoniche di tensione. Ai terminali di uscita del generatore è stato collegato un oscilloscopio

digitale (*DSO*) per registrare la forma d'onda della tensione e attraverso la trasformata di Fourier sono state studiate le componenti armoniche. I terminali di uscita del generatore sono stati collegati poi ai morsetti primari di un trasformatore di alta tensione monofase, con una potenza nominale di 375 kVA.

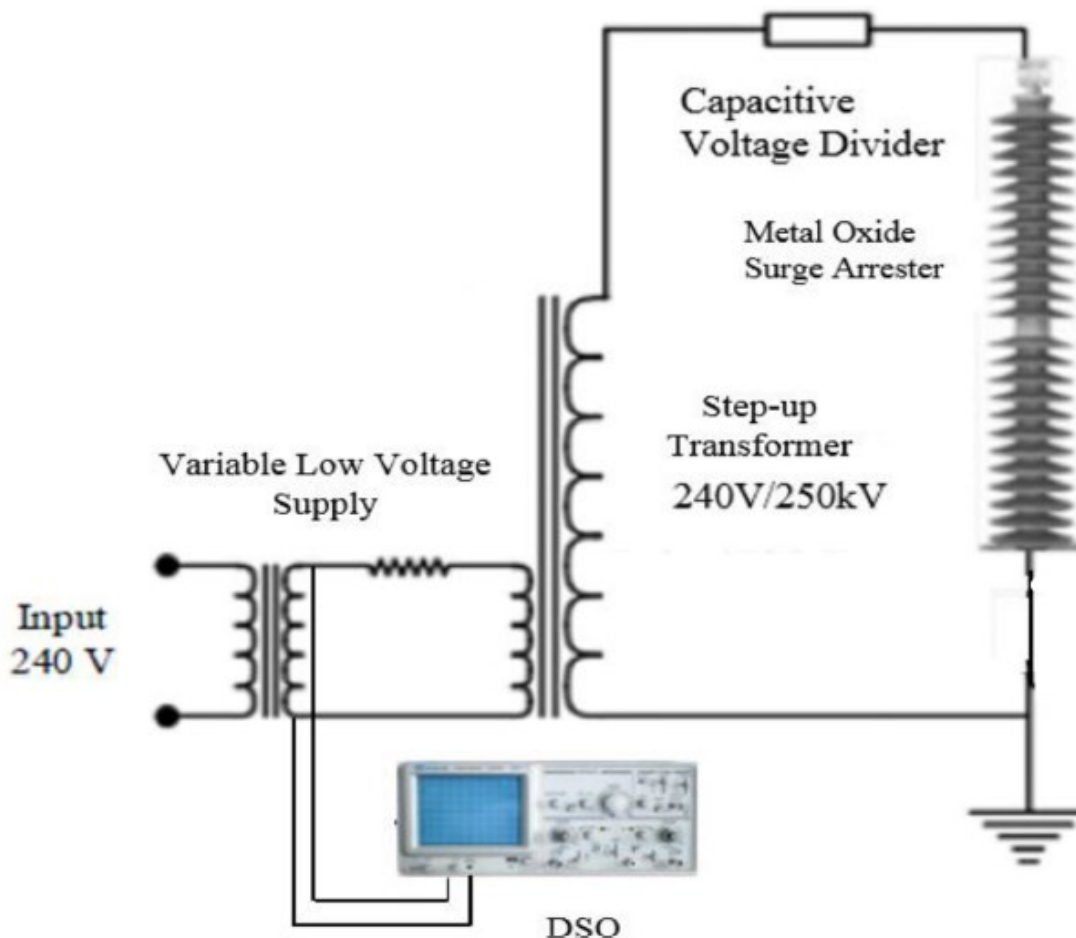


Fig. 8.1 – Schema circuitale della sperimentazione per la misura delle armoniche di tensione.

La totale corrente di picco di ogni campione è stata misurata tre volte alla tensione variabile tra 70 e 120 kV. Al circuito è stato collegato un divisore di tensione capacitivo per misurare la tensione in ingresso dello scaricatore. Al filo di connessione a terra dello scaricatore è stato collegato in serie un sensore di corrente ad elevata efficienza (range di misura: 1 μ A - 50 A, precisione di 0.2% per una corrente di 2 mA), accuratamente dimensionato affinché non fosse affetto da rumori o interferenze elettromagnetiche. L'uscita del sensore è stata connessa con un picoscopio digitale interfacciato con un computer per determinare la componente resistiva della corrente di dispersione, attraverso un modello in Simulink. Dopo aver applicato la trasformata di Fourier, sono state rappresentate le variazioni in percentuale dei valori di terza e quinta armonica di corrente.

$$\% \Delta I = \frac{I(ii) - I(i)}{I(i)} \cdot 100$$

I cambiamenti di I_{R3rd} e I_{R5th} col variare della tensione sono stati determinati in due casi differenti, tre cicli completi di tensione con la forma d'onda mostrata in Fig. 8.2. Nel caso I si ha una forma d'onda vicina alla sinusoide ideale, mentre la forma d'onda nel caso II presenta una distorsione armonica totale percentuale del 4%.

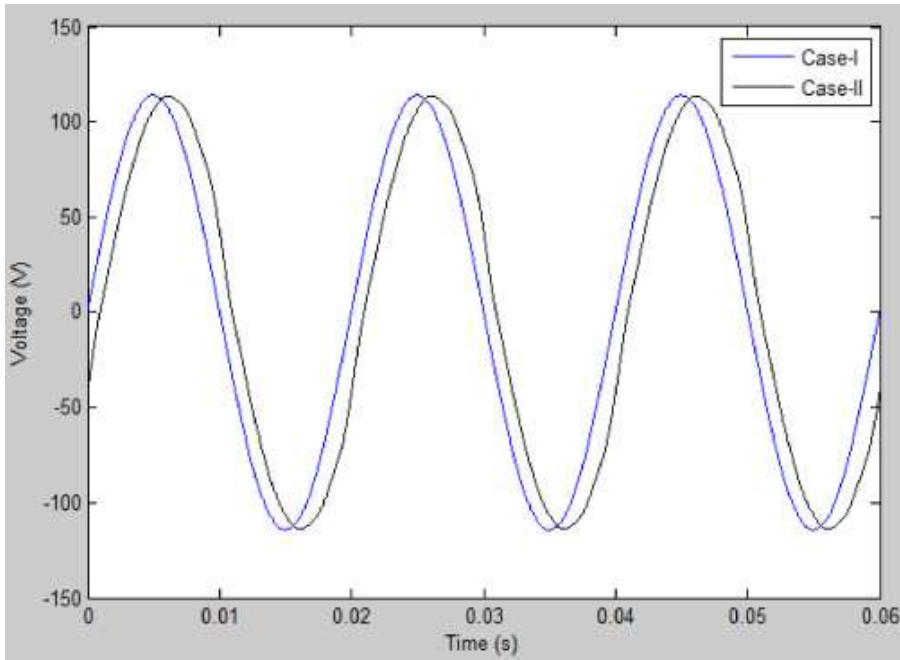


Fig. 8.2 – Forme d'onda di tensione applicate nei due casi.

La presenza del contenuto armonico nel caso II aumenta il valore del modulo della corrente di dispersione, in particolar modo della sua componente resistiva. L'aumento della corrente resistiva I_R è più pronunciato, relativamente, rispetto alla totale corrente I_T , questo perché la I_R è più sensibile al cambiamento delle armoniche di tensione. Oltre a ciò, la componente di corrente resistiva è anche affetta dai malfunzionamenti e dall'invecchiamento dello scaricatore.

Vrms (kV)	I_R Peak (μA)		Sample-II		Sample-III		Sample-IV		Sample-V	
	Case-I	Case-II	Case-I	Case-II	Case-I	Case-II	Case-I	Case-II	Case-I	Case-II
70	305.4	306.3	328.0	330.6	317.2	318.6	321.4	321.5	274.7	275.0
80	361.0	362.8	408.0	410.5	377.3	379.2	390.6	391.2	317.2	318.1
90	492.6	494.6	575.3	579.2	508.5	512.5	544.8	546.0	403.9	405.0
93	543.8	547.9	626.8	632.9	561.6	567.0	595.2	597.3	469.9	471.3
98	566.3	571.5	664.2	671.5	582.8	589.4	641.4	644.0	553.7	556.2
100	636.8	644.2	717.4	726.3	657.3	665.0	705.5	711.0	578.9	582.0
110	722.9	732.0	943.5	957.9	748.0	758.2	868.1	878.5	701.7	709.1
120	1542.2	1565.0	2163.0	2205.6	1652.0	1679.5	2017.8	2054.5	1495.1	1514.0

Fig. 8.3 – Corrente resistiva di dispersione di tutti i campioni, nei casi I e II, al variare della tensione.

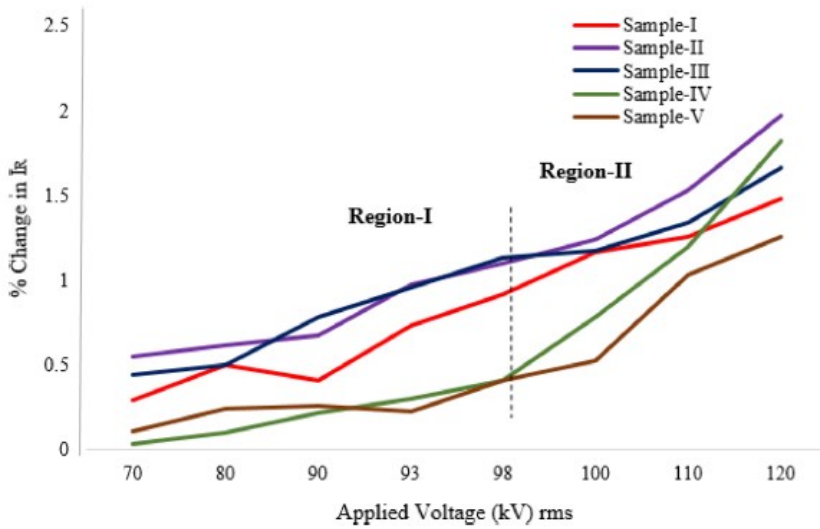


Fig. 8.4 – Variazione percentuale della corrente resistiva nei cinque campioni, al variare della tensione applicata.

Una volta analizzate le componenti armoniche della corrente, è stato rivelato come l'influenza dalla V_{3rd} nel valore di picco della I_{R3rd} sia maggiore rispetto quella della V_{5th} per la I_{R5th} . Per questo motivo, il valore di picco della I_{R5th} è stato considerato più accurato per indicare il livello di invecchiamento dello scaricatore.

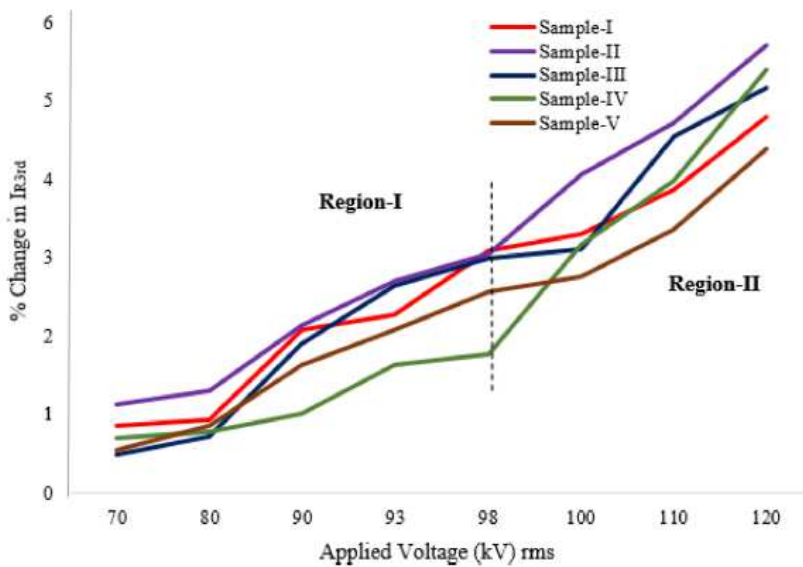


Fig. 8.5 – Variazione percentuale della componente di terza armonica di corrente resistiva nei cinque campioni, al variare della tensione applicata.

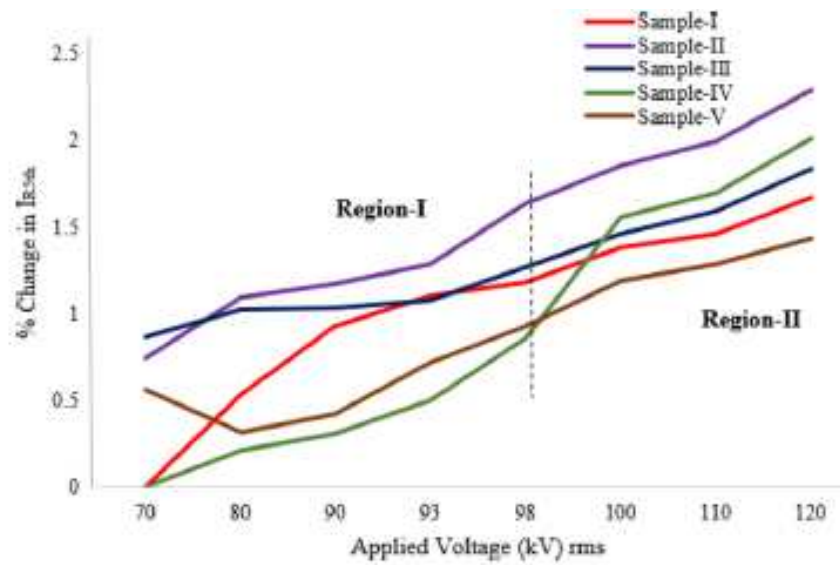


Fig. 8.6 – Variazione percentuale della componente di quinta armonica di corrente resistiva nei cinque campioni, al variare della tensione applicata.

Sulle basi di quanto affermato precedentemente, analizzando gli andamenti delle componenti di corrente resistive, il campione II risulta essere quello più colpito dall'invecchiamento, tra i cinque sui quali è stata svolta la sperimentazione.

9. VARISTORE IN OSSIDO DI ZINCO CON DROGAGGIO DI BORO E SODIO PER AUMENTARE LA STABILITÀ ALL'IMPULSO DI CORRENTE

Il varistore in ossido di zinco (ZnO) è composto da un materiale ceramico semiconduttore policristallino, con dopanti come alcuni ossidi di Bi (bismuto), Co (cobalto) e Sb (antimonio). È stato ampiamente utilizzato per la protezione dei circuiti, sistemi e dispositivi elettronici contro gli impulsi di tensione, grazie alla loro caratteristica non lineare di corrente-tensione (I-V) e l'alta capacità di assorbimento di energia. Tuttavia, la loro applicazione in certi campi, come industria spaziale e militare, è ancora limitata. È urgentemente richiesto di migliorare la stabilità del varistore ZnO, in particolar modo contro gli impulsi di corrente. L'elevata energia trasportata da una fulminazione, per esempio, causa un rapido deterioramento delle caratteristiche elettriche dei varistori, o addirittura la loro distruzione. Avere un'alta stabilità all'impulso di corrente può evitare tale degrado e quindi migliorare gli effetti protettivi del dispositivo. Il modo più consistente di studiare il meccanismo di degrado del varistore, attraverso risultati sperimentali, è la teoria della migrazione ionica di Gupta. Questa teoria riguarda lo spostamento degli ioni interstiziali di zinco, carichi positivamente, spinti dal campo elettrico attraverso i contorni dei grani per compensare le zone di impoverimento, cariche negativamente. Questo fenomeno indica che la concentrazione e la migrazione degli ioni interstiziali svolgono un ruolo significativo nel migliorare la stabilità agli impulsi di corrente e il comportamento contro il degrado. Gli studi hanno evidenziato come si possa migliorare la stabilità dei varistori attraverso l'aggiunta di alcuni ossidi. Il primo effetto ottenibile è quello di incrementare la densità del materiale ceramico e diminuire la concentrazione dei difetti interstiziali, in modo da evitare la migrazione degli ioni positivi. Questo risultato potrebbe essere raggiunto attraverso l'aggiunta dell'ossido di boro (B), introdotto nei campioni per formare uno stato vetroso nel processo di sinterizzazione. In secondo luogo, una piccola quantità di sodio (Na), ione monovalente, potrebbe rimpiazzare i siti interstiziali, permeando i grani di ZnO. Tuttavia, la migliore stabilità ottenuta dall'introduzione di soli boro e sodio ancora non raggiunge le richieste in alcune applicazioni. Quindi, lo studio condotto in Cina nel 2017 da Jinlou Shen, Shenglin Jiang, Yuchun Xu, Mingyu Li, Shuai Zhu, Zhibiao Chen, Xiafang Lin, Huan Liu, Honglang Li, Guangzu Zhang, combina i due diversi effetti insieme. Questo studio investiga gli effetti del rapporto di B/Na sulle proprietà elettriche dei varistori in ZnO, in particolare il comportamento della stabilità agli impulsi di corrente. Più specificatamente, data una concentrazione fissa di boro, sono stati analizzati gli effetti della variazione della concentrazione del drogaggio di sodio, per ricavare la composizione ottimale al fine di avere la maggiore stabilità. La concentrazione di boro è stata determinata dagli studi sulla stabilità dei varistori colpiti da grandi impulsi di corrente.

La caratteristica campo elettrico-densità di corrente (E-J) è stata calcolata nella regione di *pre-breakdown* con un misuratore di caratteristica a transistor. Quindi è stato determinato il coefficiente non lineare α come:

$$\alpha = \frac{\log J2 - \log J1}{\log E2 - \log E1}$$

Viene inoltre definito l'indice K, come il rapporto tra la tensione di protezione V_C e la tensione di rottura, misurata con una corrente di 1.0 mA, V_{1mA} :

$$K = \frac{V_C}{V_{1mA}}$$

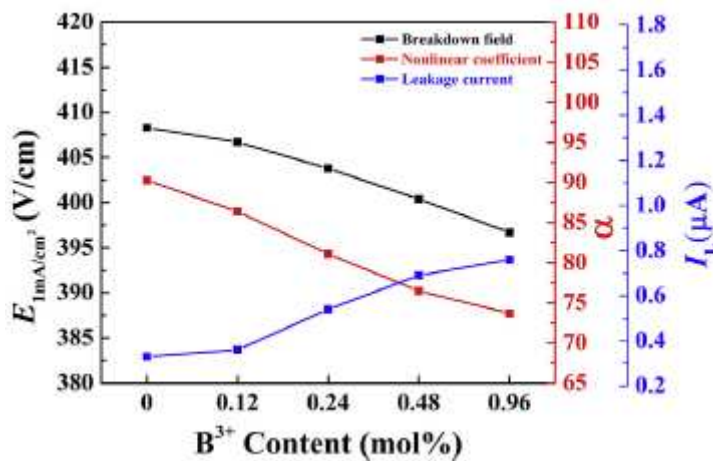


Fig. 9.1 - Influenza della concentrazione in mol% di B³⁺ sul campo elettrico di rottura (*breakdown field*) E_{1mA/cm^2} , sul coefficiente non lineare α e sulla corrente di dispersione I_L .

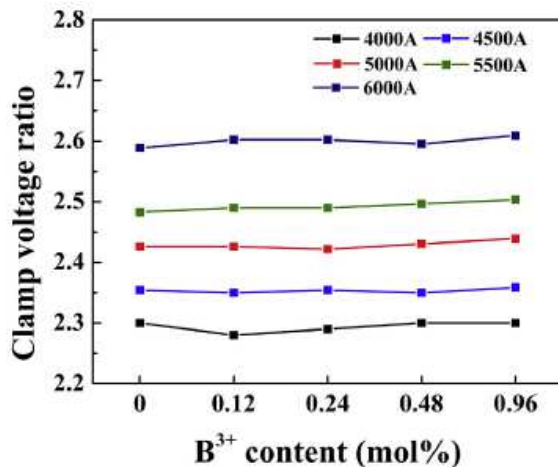


Fig. 9.2 - Variazione dell'indice di tensione di protezione (*clamp voltage ratio*) al variare della concentrazione di B³⁺, per diversi valori di impulsi di corrente.

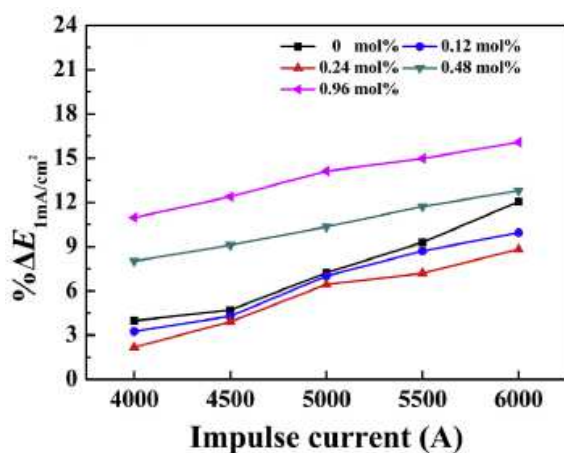


Fig. 9.3 – Variazione in percentuale del campo elettrico di rottura al variare dell'impulso di corrente, per diversi valori di concentrazione molare di B^{3+} .

I campioni per la sperimentazione sono stati preparati seguendo la procedura standard per i materiali ceramici: inizialmente le polveri di ossidi (Sb/Bi/Co/Mn/Ni/Cr/Mg/Si) sono state miscelate e macinate per 6 ore. Dopo essere state essiccate a 120 °C e calcinate a 750 °C per 2 ore, la miscela è stata nuovamente macinata in polvere e aggiunta all'ossido di zinco con nitrato di alluminio. Successivamente il composto è stato addensato ad una pressione di 100 Mpa. I compatti sono stati sinterizzati a 1180 °C e quindi raffreddati con una velocità di raffreddamento da 5 °C/min a 850 °C. I campioni sono stati mantenuti a 850 °C per 5 ore e poi raffreddati naturalmente. Gli elettrodi superficiali sono stati ricotti a 600 °C per 10 minuti.

Specimen name	Moles ratio		Weight ratio	
	H_3BO_3/Na_2CO_3	B/Na	H_3BO_3/Na_2CO_3	B/Na
Z0	—	—	—	—
Z1	0.24/0	0.24/0	14.84/0	2.59/0
Z2	0.24/0.06	0.24/0.12	14.84/6.36	2.59/2.76
Z3	0.24/0.08	0.24/0.16	14.84/8.48	2.59/3.68
Z4	0.24/0.12	0.24/0.24	14.84/12.72	2.59/5.52
Z5	0.24/0.18	0.24/0.36	14.84/19.08	2.59/8.28
Z6	0.24/0.24	0.24/0.48	14.84/25.44	2.59/11.04

Fig. 9.4 – In questa tabella sono presentati i campioni con il loro grado di concentrazione.

Per l'analisi della microstruttura è stata eseguita una cristallografia a raggi X (XRD), ossia una tecnica della cristallografia in cui l'immagine, prodotta dalla diffrazione dei raggi X attraverso lo spazio del reticolo atomico in un cristallo, viene registrata e quindi analizzata per rivelare la natura del reticolo. La microstruttura della ceramica sinterizzata è stata osservata mediante microscopia elettronica a scansione (SEM), mentre per la valutazione della dimensione media del grano è stato utilizzato il metodo di regressione lineare, un metodo di stima statistica.

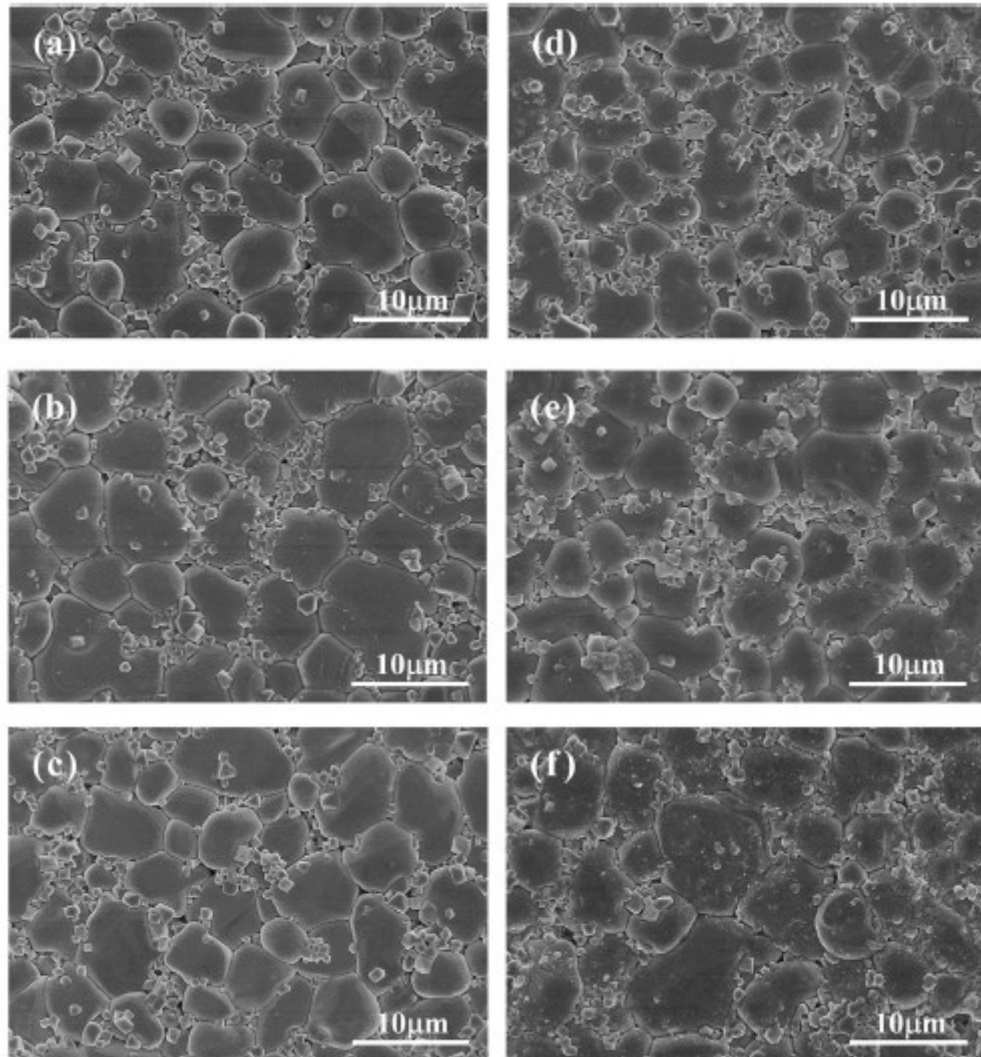


Fig. 9.5 – Microscopia elettronica a scansione dei campioni con diversa concentrazione di Na^+ .

La presenza degli ioni di sodio diminuisce la mobilità nei contorni dei grani di ZnO e inibisce la loro crescita, mentre l'ossido borico contribuisce all'ingrandimento dei grani. Con un drogaggio di 0.12 mol% di Na^+ , la misura media dei grani del campione Z2 (b) risulta essere maggiore di quella del campione Z0 (a). Con un contenuto maggiore di sodio, l'effetto inibitorio dell'accrescimento diventa più evidente, infatti con una dose di 0.24 mol% di Na^+ e B^{3+} , la misura media nel campione Z4 (d) è la più piccola.

In Fig. 9.6 è mostrato l'effetto della quantità di Na^+ sulla caratteristica campo elettrico di rottura-densità di corrente (E-J). Il campo di rottura si riduce da 4083 V/cm in Z0 a 4055 V/cm per il campione con un drogaggio di 0.12 mol% (Z1), ma accrescendo la concentrazione di Na^+ il valore del campo aumenta gradualmente e raggiunge il massimo di 4187 V/cm per il campione Z4, con 0.24 mol%. Dopodiché il valore di campo diminuisce con l'aumentare della concentrazione di Na^+ .

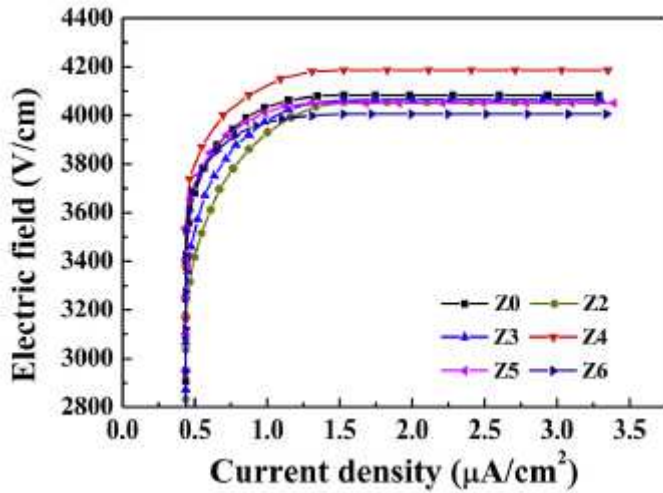


Fig. 9.6 – Caratteristica E-J per i diversi campioni studiati.

I risultati sono da attribuire alla variazione della dimensione dei grani di ZnO. Il campo elettrico di rottura può essere espresso come:

$$E_{1mA/cm^2} = V_{gb} / d$$

Dove d è la grandezza media dei grani e V_{gb} è la tensione di rottura per ogni contorno dei grani. Dall'equazione è evidente che maggiore è la misura dei grani dei campioni, minore sarà il valore del campo elettrico.

L'andamento della corrente di dispersione I_L e del coefficiente non lineare α , al variare delle diverse concentrazioni di Na^+ , è mostrato in Fig. 9.7.

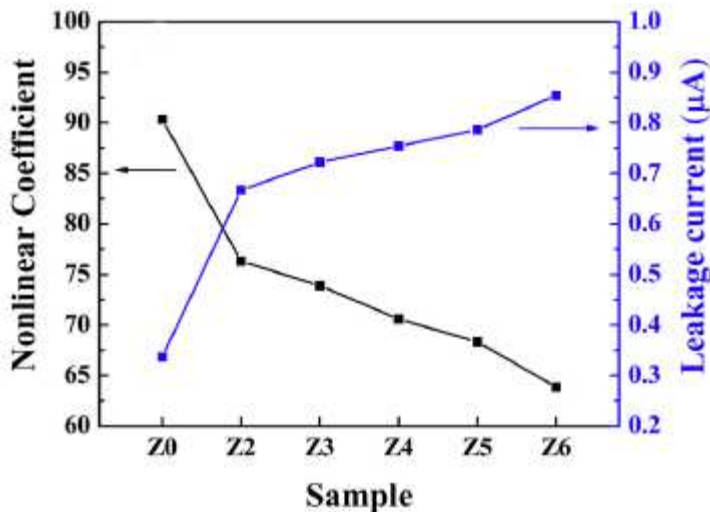


Fig. 9.7 – Coefficiente non lineare α e corrente di dispersione per i diversi campioni.

La corrente di dispersione è determinata soprattutto dal contorno dei grani. Gli ioni di sodio si dissolvono nella struttura del bismuto, generando un fluido con alta conducibilità elettrica;

per questo motivo si ha un aumento della corrente quasi proporzionale con la concentrazione di sodio. Il coefficiente non lineare invece ha un andamento inversamente proporzionale con la quantità di sodio presente nel campione; il motivo è che il coefficiente α è strettamente legato alla barriera di potenziale, la cui altezza viene ridotta dalla presenza di Na^+ .

La tensione di protezione (*clamping voltage*) e il rapporto K dei differenti campioni, dopo aver applicato impulsi di corrente tra 4000 A e 6000 A, sono elencati in Fig. 9.8.

Sample	$V_{1mA}(V)$	$V_C (V)$					$K = V_C/V_{1mA}$				
		4000 A	4500 A	5000 A	5500 A	6000 A	4000 A	4500 A	5000 A	5500 A	6000 A
Z0	817	1880	1960	1960	1969	2120	2.3	2.4	2.4	2.4	2.6
Z2	811	1870	1950	2030	2110	2190	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7
Z3	813	1950	2030	2110	2200	2280	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8
Z4	837	2180	2260	2340	2340	2430	2.6	2.7	2.8	2.8	2.9
Z5	810	2110	2190	2190	2270	2350	2.6	2.7	2.7	2.8	2.9
Z6	801	2080	2160	2160	2240	2322	2.6	2.7	2.7	2.8	2.9

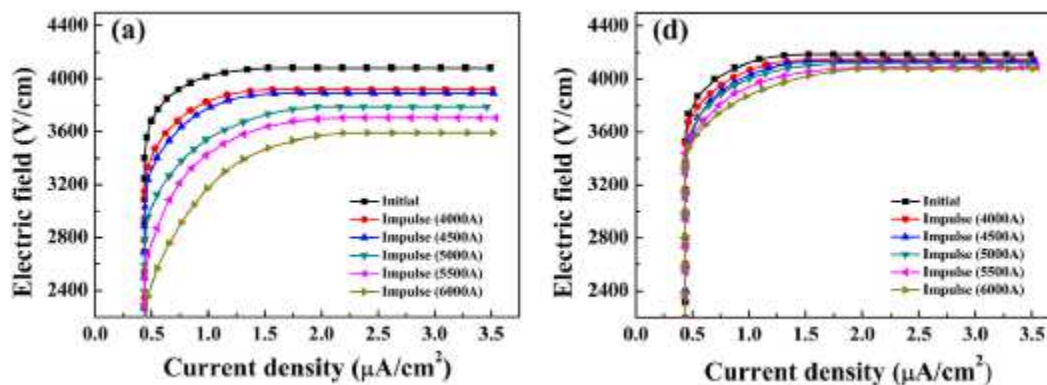
Fig. 9.8 – Tensione di rottura (V_{1mA}), tensione di protezione (V_C) e rapporto K dei campioni al variare del contenuto di Na^+ , per diversi impulsi di corrente.

Come è possibile notare, il rapporto K aumenta maggiore è il contenuto di Na^+ e il valore massimo si ottiene nel campione con 0.24 mol% (Z4). Esso dipende dalla tensione di protezione, definita come la tensione ai capi degli elettrodi di un campione quando viene attraversato da uno specifico impulso di corrente, e può essere calcolata come:

$$V_C = CR_g I + V_0$$

Dove I è l'impulso di corrente, R_g è la resistenza all'interno dei grani, V_0 è la tensione legata ai contorni dei grani e C è un fattore di correzione empirico. Da questa equazione risulta che il rapporto K dipende soprattutto dalla resistenza interna dei grani nelle regioni ad alta corrente, e il suo comportamento può essere significativamente migliorato alzando la conducibilità elettrica dei grani, per esempio aggiungendo degli ioni di alluminio Al^{3+} .

Sono state poi messe in evidenza le variazioni della caratteristica E-J dopo aver applicato l'impulso di corrente ai diversi campioni. I risultati mostrano che la caratteristica è influenzata dall'aggiunta degli ioni di sodio. Il campione drogato con 0.24 mol% di B^{3+} e 0.24 mol% di Na^+ presenta la più piccola variazione della caratteristica E-J, quindi esso è il campione con la più alta stabilità all'impulso di corrente.



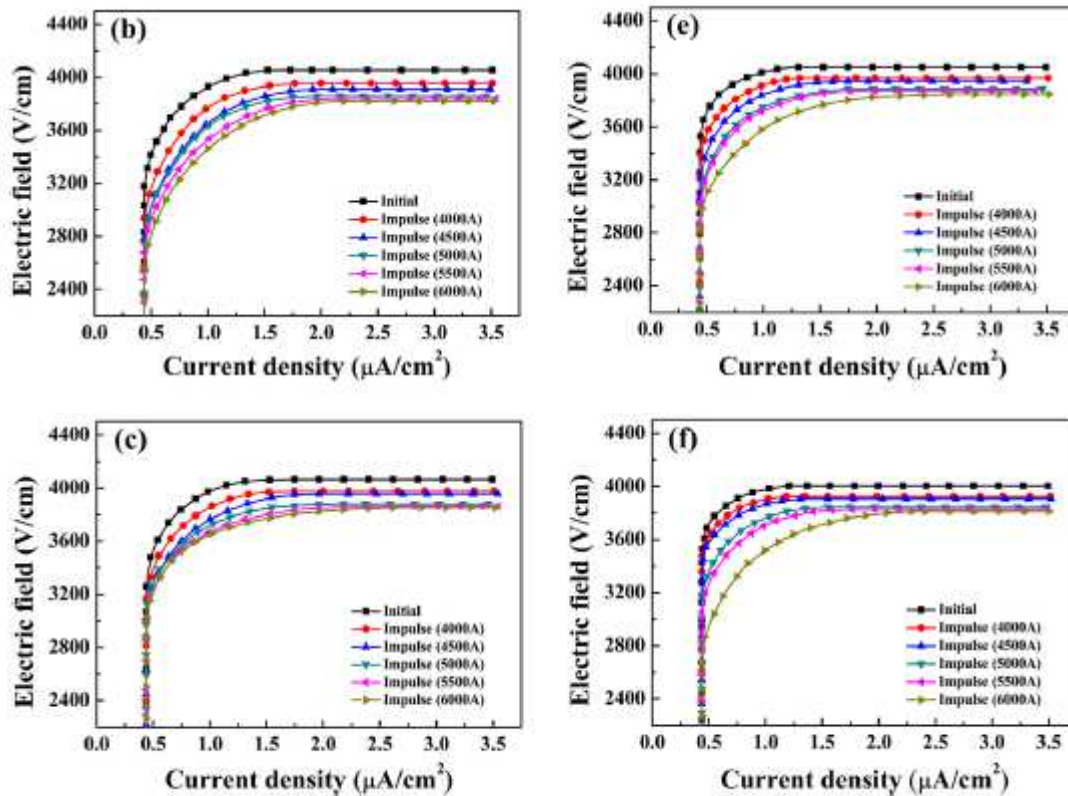


Fig. 9.9 – Caratteristiche E-J prima e dopo l'applicazione degli impulsi di corrente, per i diversi campioni: (a) Z0, (b) Z2, (c) Z3, (d) Z4, (e) Z5, (f) Z6.

In conclusione, si può dedurre dalla sperimentazione che le proprietà elettriche dei varistori in ossido di zinco sono fortemente dipendenti dalla microstruttura del materiale, la quale è influenzata in modo significativo dal rapporto di boro e sodio (B/Na). Con un drogaggio di 0.24 mol% di boro e sodio si è osservato un comportamento migliore agli impulsi di corrente, determinato da una più alta stabilità. Questo studio ha quindi un'utilità pratica per aumentare la resistenza al degrado e l'effetto protettivo per i dispositivi di difesa contro le scariche elettriche.

10. NORMATIVA – REQUISITI E METODI DI PROVA PER SPD CONNESSI A RETI DI BASSA TENSIONE

Il testo di riferimento riguardante la modalità di prova è la norma IEC 61643-11 (*Low-voltage surge protective devices - Part 11: Surge protective devices connected to low-voltage power systems - Requirements and test methods*). La norma è applicabile ai dispositivi per la protezione da sovratensioni contro gli effetti indiretti e diretti di fulmini o altre sovratensioni transitorie. Questi dispositivi sono ideati per essere collegati a reti alla frequenza di 50/60 Hz c.a. e apparecchiature fino a 1000 V r.m.s. Vengono stabilite le caratteristiche prestazionali, i metodi standard per i test e le relative valutazioni.

Vengono definite le condizioni di servizio:

- Range di frequenza da 47 Hz a 63 Hz a. c.
- La tensione deve essere applicata continuamente tra i terminali del dispositivo (SPD) e non deve eccedere la sua massima tensione operativa U_C .
- Pressione dell'aria tra 80 kPa a 106 kPa, ad un'altitudine di +2000 m fino a -500 m, rispettivamente.
- Range normale di temperatura da -5 °C a +40 °C (indicato per ambienti interni protetti).
- Range esteso di temperatura da -40 °C a +70 °C (indicato per ambienti esterni non protetti).
- Range normale di umidità da 5% a 95% (per ambienti interni).
- Range esteso di umidità da 5% a 100% (per ambienti esterni).

I dispositivi sono classificati a seconda dei seguenti parametri:

- Numero di porte (Una porta: senza impedenze in serie; Due porte: con impedenza specifica in serie connessa per separare i morsetti di ingresso e uscita).
- Design (a seconda che siano progettati con lo scopo di interrompere o limitare la tensione, o una combinazione dei due)
- Classe I, II o III.
- Localizzazione (all'aperto o in ambiente chiuso).
- Accessibilità (se può essere parzialmente o interamente toccato da una persona non specializzata, senza l'uso di strumenti per aprire una qualsiasi copertura o recinzione).
- Metodi di montaggio (fisso o portatile).
- Caratteristiche dei disconnettori (incluse le protezioni contro le sovracorrenti).
- Grado di protezione garantita dalle coperture o recinzioni.
- Range di temperatura e umidità (normale o esteso).

- Rete di alimentazione (frequenza compresa tra 47 Hz e 63 Hz in a.c. o un range di frequenza diversa, in tal caso sono richieste procedure diverse o addizionali).
- SPD multipolo (tipo di SPD con più di una modalità di protezione o una combinazione di SPD interconnessi elettricamente).
- Comportamento in caso di guasto (circuito aperto o cortocircuito).

Sono poi definiti i requisiti per ogni oggetto:

- Il costruttore deve fornire tutte le informazioni per l'identificazione del componente.
- Il dispositivo deve essere contrassegnato con dei marchi indelebili e leggibili e non situati in presenza di viti o parti rimovibili.
- Devono essere specificati i requisiti elettrici:
 - **Protezione contro i contatti diretti:** Questi requisiti sono validi per SPD accessibili dove la tensione U_C è superiore a 50 V r.m.s. Per la protezione contro il contatto diretto gli SPD devono essere progettati in modo tale che le parti in tensione non possano essere toccate quando sono installati per l'uso previsto. Gli SPD devono essere progettati in modo tale che, quando sono cablati e montati come per il normale utilizzo, le parti in tensione non siano accessibili, anche dopo rimozione di parti che possono essere tolte senza l'uso di uno strumento. Il collegamento tra i terminali di terra e tutte le parti accessibili ad essi collegate deve essere di bassa resistenza.
 - **Corrente residua I_{PE}:** Per tutti gli SPD con un terminale per il conduttore di protezione, la corrente residua deve essere misurata quando tutti i terminali sono collegati a un'alimentazione alla tensione di prova di riferimento (U_{REF}) secondo le istruzioni del produttore.
 - **Livello di protezione U_p :** Il livello di tensione misurato non deve superare il livello di protezione specificato dal costruttore.
 - **Dovere operativo:** L'SPD deve essere in grado di resistere a specifiche correnti di scarica durante l'applicazione della tensione di esercizio continuativa massima U_C senza variazioni inaccettabili delle sue caratteristiche.
 - **Disconnettori:** Ogni SPD deve possedere dei disconnettori (interni, esterni, o entrambi), eccetto nel caso di connessione N-PE in sistemi TN o TT. Il loro funzionamento deve essere mostrato da degli indicatori di stato specifici.
 - **Protezione Termica:** Gli SPD devono essere protetti contro i surriscaldamenti dovuti a degradazione e stress elevato.
 - **Comportamento delle correnti di cortocircuito:** Un SPD deve guastarsi senza causare una condizione pericolosa o resistere alle potenziali correnti di cortocircuito del sistema di alimentazione che possono verificarsi durante una situazione di guasto.

- **Indicatori di stato:** Il fabbricante deve fornire informazioni sulla funzione dell'indicatore e sulle azioni da intraprendere dopo la modifica dell'indicazione di stato. Un indicatore di stato può essere composto da due parti (una delle quali non viene sostituita in caso di sostituzione dell'SPD), collegate da un meccanismo di accoppiamento che può essere meccanico, ottico, audio, elettromagnetico, ecc. La parte dell'indicatore di stato che non è sostituito deve essere in grado di funzionare almeno 50 volte.
- **Resistenza di isolamento:** La resistenza di isolamento deve essere adeguata al livello delle correnti di dispersione e al grado di protezione verso i contatti diretti.
- **Tenuta dielettrica:** La tenuta dielettrica deve essere adeguata rispetto al valore della tensione di rottura dell'isolamento e al grado di protezione verso i contatti diretti.
- **Comportamento in caso di sovratensioni temporanee:** Un SPD deve superare il test per le sovratensioni temporanee e soddisfare i parametri descritti dal costruttore.
- Devono essere specificati i requisiti meccanici:
 - **Montaggio:** Gli SPD devono essere dotati di mezzi adeguati per il montaggio che garantiscano la stabilità meccanica. Deve essere fornita una codifica per evitare combinazioni errate di moduli SPD plug-in e prese. La conformità è verificata mediante ispezione visiva.
 - **Viti, parti percorse da correnti e connessioni:** La conformità è verificata mediante ispezione e montaggio di prova.
 - **Connessioni esterne:** I collegamenti elettrici devono essere eseguiti utilizzando uno dei seguenti mezzi:
 - morsetti a vite e connessioni bullonate;
 - terminali senza viti;
 - connessioni a perforazione d'isolante;
 - terminazioni piatte a connessione rapida;
 - cavi volanti;
 - altri mezzi ugualmente efficaci;
 - spine e/o prese standardizzate.
 - **Spazi d'aria e distanze di dispersione:** La conformità è verificata mediante un test specifico.
 - **Resistenza meccanica:** Tutte le parti di un SPD relative alla protezione contro il contatto diretto devono avere una sufficiente resistenza meccanica, la cui conformità è verificata mediante un test.
- Devono essere specificati i requisiti ambientali e del materiale:
 - **Protezione fornita dalla recinzione:** Gli SPD devono essere provvisti di una recinzione per la protezione contro l'ingresso di oggetti solidi o acqua, in accordo con il codice IP dichiarato dal costruttore.

- **Resistenza al calore:** Gli SPD devono avere una sufficiente resistenza alle alte temperature.
- **Resistenza agli incendi:** Le parti isolanti dell'alloggiamento devono essere non infiammabili o autoestinguenti.
- **Resistenza di tracciamento:** Deve essere verificato l'indice di tracciamento dei materiali isolanti, per evitare che si crei un percorso conduttivo tra i collegamenti elettrici.
- Deve essere verificata la compatibilità elettromagnetica:
 - **Immunità elettromagnetica:** Gli SPD che non incorporano circuiti elettronici o che incorporano circuiti elettronici in cui tutti i componenti sono passivi (ad esempio diodi, resistori, condensatori, induttori, varistori e altri componenti di protezione contro le sovratensioni) non sono sensibili ai disturbi elettromagnetici previsti in normali condizioni di servizio e quindi non necessitano di test di immunità. Quando sono contenuti circuiti elettronici sensibili ci si riferisce alla IEC 61000.
 - **Emissioni elettromagnetiche:** Per gli SPD che non incorporano circuiti elettronici o che incorporano circuiti elettronici che non generano frequenze fondamentali superiori a 9 kHz durante il normale funzionamento, i disturbi possono essere generati solo durante le operazioni di protezione. La durata di questi i disturbi sono dell'ordine di microsecondi o millisecondi. La frequenza, il livello e le conseguenze di queste emissioni sono considerati parte del normale ambiente elettromagnetico degli impianti a bassa tensione. Pertanto, i requisiti per le emissioni elettromagnetiche si ritengono soddisfatti e non è necessaria alcuna verifica. Per SPD contenenti circuiti elettronici che svolgono una funzione di commutazione operante a frequenze superiori di 9 kHz ci si riferisce alla IEC 61000.
- Sono definiti dei criteri addizionali per specifici design di SPD:
 - **SPD a una o due porte con terminali separati di ingresso e uscita:**
 - **Corrente di carico nominale I_L ;**
 - **Comportamento al sovraccarico;**
 - **Corrente di cortocircuito nominale lato carico;**
 - **Test sull'ambiente per SPD montati all'esterno.**
 - **SPD con circuiti isolati separati:** Se un SPD include un circuito isolato elettricamente dal circuito principale, il costruttore deve fornire informazioni sulle tensioni di isolamento e di tenuta dielettrica tra i circuiti, nonché le norme pertinenti a cui il costruttore dichiara la conformità.
 - **SPD di tipo cortocircuitale:** Questi SPD devono essere in grado di resistere a una prova di corrente di cortocircuito alla loro corrente nominale di cortocircuito dichiarata dopo essere stati sovraccaricati da un picco di corrente.
 - **SPD portatili classificati come apparecchiature collegabili di tipo A.**

- Possono essere dichiarati dal costruttore ulteriori requisiti:
 - Per SPD a una o due porte:
 - **Corrente di scarica totale I_{Total} per SPD multipolo.**
 - Solo per SPD a due porte:
 - **Caduta di tensione.**
 - **Capacità di tenuta all'impulso lato carico.**
 - **Derivata dalla tensione (du/dt).**

Successivamente vengono definite le modalità di prova per i test sui componenti: possono essere prove di tipo, di routine o di accettazione.

PROVE DI TIPO

Le prove di tipo sono eseguite su tre campioni, uno per ogni classe di scaricatori, seguendo una sequenza di test specifici. Se il campione sottoposto a tutta la sequenza di test rispetta i requisiti dichiarati dal costruttore allora la prova viene superata. Se uno o più campioni non superano la prova, gli SPD in questione non soddisfano gli standard.

1. PROCEDURE GENERALI DI PROVA

Lo scaricatore deve essere montato e collegato elettricamente secondo le procedure di installazione del produttore. Non devono essere utilizzati né metodi di raffreddamento né di riscaldamento esterni. Se non diversamente specificato, la prova deve essere eseguita all'aria aperta e la temperatura ambiente deve essere di $20\text{ °C} \pm 15\text{ °C}$. Se non diversamente specificato, per tutte le prove in cui è richiesta un'alimentazione a U_{REF} o U_C , la tolleranza di tensione per la prova deve essere tra +0 % e -5 %. Quando si testano gli SPD per i quali il costruttore fornisce cavi integrali, l'intera lunghezza di tali cavi deve far parte dell'SPD in prova. Se non diversamente specificato, durante la prova non è consentita alcuna manutenzione o smontaggio dell'SPD. I sezionatori esterni devono essere selezionati secondo le istruzioni del produttore e collegati per il test, se necessario. Tutte le prove devono essere eseguite su ciascuna modalità di protezione dichiarata dal costruttore, tuttavia, se alcune modalità di protezione hanno circuiti identici, è possibile eseguire una sola prova sulla modalità di protezione che presenta la configurazione più vulnerabile, utilizzando nuovi campioni ogni volta. Per i dispositivi multimodali (ad es. SPD trifase) in cui il circuito dei componenti di protezione è identico, il test di ciascuna delle modalità (ad es. tre fasi) può soddisfare i requisiti di tutti e tre. Per gli SPD con un terminale N designato che possono essere applicati in sistemi senza neutro distribuito secondo le istruzioni del produttore, è richiesto un test separato per la modalità di protezione con il neutro non collegato.

Se è richiesto l'uso di carta velina:

- Per SPD fissi: la carta velina deve essere fissata a una distanza di $100\text{ mm} \pm 20\text{ mm}$ in tutte le direzioni del campione, eccetto la superficie di montaggio.

- Per gli SPD portatili: la carta velina deve essere avvolta liberamente su tutti i lati dell'SPD, compreso il lato inferiore.

Se richiesto, uno schermo metallico deve essere posizionato adiacente a tutti i lati dell'SPD. I dettagli, comprese le distanze dello schermo metallico dall'SPD, devono essere indicati nel verbale di prova. Le caratteristiche dello schermo metallico devono essere le seguenti:

- Struttura:
 - Rete metallica intrecciata.
 - Metallo perforato o lamiera stirata.
- Rapporto area foro/area totale: 0,45-0,65.
- Dimensione del foro non superiore a 30 mm².
- Finitura: scoperto o placcatura conduttiva.
- Resistenza: la resistenza tra il punto più lontano dello schermo metallico e il punto di collegamento dello schermo metallico deve essere sufficientemente bassa da non limitare la corrente di cortocircuito del circuito dello schermo.

Lo schermo metallico deve essere collegato tramite un fusibile da 6 A gL/gG a uno dei terminali SPD in prova. La connessione dello schermo deve essere modificata all'altro terminale SPD dopo ogni applicazione di cortocircuito.

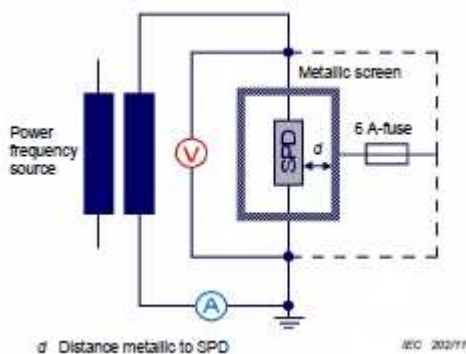


Fig. 10.1 – Disposizione per il test con lo schermo metallico.

1.1 Corrente di scarica impulsiva per il test di Classe I

La corrente di scarica impulsiva che attraversa il dispositivo in prova è definita dal valore di cresta I_{imp} , dalla carica Q e dall'energia specifica W/R . La corrente impulsiva non deve presentare inversione di polarità e deve raggiungere I_{imp} entro 50 μ s. Il trasferimento della carica Q deve avvenire entro 5 ms e l'energia specifica W/R deve essere dissipata entro 5 ms. La durata dell'impulso non deve superare i 5 ms. Vengono applicate le seguenti tolleranze:

- I_{imp} : -10 % / +10 %
- Q : -10 % / +20 %
- W/R : -10 % / +45 %

I_{imp} within 50 μs kA	Q within 5 ms As	W/R within 5 ms kJ/ Ω
25	12,5	156
20	10	100
12,5	6,25	39
10	5	25
5	2,5	6,25
2	1	1
1	0,5	0,25

Fig. 10.2 – Parametri preferibili per il test di Classe I.

1.2 Impulso di corrente utilizzato per tensioni residue di Classe I e Classe II e prove di funzionamento

La forma d'onda è 8/20. Le tolleranze sulla forma d'onda della corrente che attraversa il dispositivo in prova sono le seguenti:

- Valore di cresta: $\pm 10\%$
- Tempo di salita: $\pm 10\%$
- Tempo all'emivalore $\pm 10\%$

Un piccolo superamento o oscillazione è tollerato a condizione che l'ampiezza di qualsiasi oscillazione non sia superiore al 5 % del valore di cresta. Qualsiasi inversione di polarità dopo che la corrente è scesa a zero non deve essere superiore al 30 % del valore di cresta.

1.3 Impulso di tensione utilizzato per prove di innesco di Classe I e II

La forma d'onda della tensione standard è 1,2/50. Le tolleranze della forma d'onda della tensione a circuito aperto nei punti in cui verrà collegato il dispositivo in prova sono le seguenti:

- Valore di cresta: $\pm 5\%$
- Tempo di salita: $\pm 30\%$
- Tempo all'emivalore $\pm 20\%$

Oscillazioni o superamenti possono verificarsi in corrispondenza della cresta dell'impulso. Se la frequenza di tali oscillazioni è superiore a 500 kHz o la durata del superamento è inferiore a 1 μs , deve essere tracciata una curva media e, ai fini della misurazione, l'ampiezza massima di questa curva media definisce il valore di cresta misurato della tensione di prova. Non sono ammesse oscillazioni superiori al 3 % del valore di cresta sulla parte ascendente dell'impulso di tensione tra lo 0 % e l'80 % del valore di cresta. I dispositivi di misurazione devono avere una larghezza di banda complessiva di almeno 25 MHz e il superamento deve essere inferiore al 3 %. La corrente di cortocircuito del generatore di prova deve essere inferiore al 20 % della corrente di scarica nominale I_n dell'SPD.

1.4 Onda combinata utilizzata per i test di Classe III

L'impulso standard di un generatore di forme d'onda combinato è caratterizzato dalla tensione di uscita in condizioni di circuito aperto e dalla corrente di uscita in condizioni di cortocircuito. La tensione a circuito aperto deve avere un tempo di fronte di $1.2 \mu\text{s}$ e un tempo all'emivalore di $50 \mu\text{s}$. La corrente di cortocircuito deve avere un tempo di fronte di $8 \mu\text{s}$ e un tempo all'emivalore di $20 \mu\text{s}$. Le tolleranze della tensione a circuito aperto sono le seguenti (Queste tolleranze si riferiscono al solo generatore, senza alcun SPD o circuito di alimentazione collegato):

- Valore di cresta: $\pm 5 \%$
- Tempo di salita: $\pm 30 \%$
- Tempo all'emivalore $\pm 20 \%$

Le tolleranze della corrente di cortocircuito sono le seguenti (Queste tolleranze del generatore devono essere soddisfatte con o senza alcun circuito di alimentazione collegato, a seconda che la prova debba essere eseguita sotto tensione o meno):

- Valore di cresta: $\pm 10 \%$
- Tempo di salita: $\pm 10 \%$
- Tempo all'emivalore $\pm 10 \%$

Disposizione per la prova:

L'impedenza fittizia del generatore deve essere nominalmente 2Ω . Per definizione, l'impedenza fittizia è il rapporto tra il valore di cresta della tensione a vuoto U_{OC} diviso per il valore di cresta della corrente di cortocircuito I_{SC} . I suddetti requisiti di forma d'onda e tolleranza si applicano solo alla prova eseguita al valore di U_{OC} dichiarato dal produttore, che potrebbe richiedere alcune regolazioni del generatore per essere raggiunto. L'elemento di accoppiamento del generatore deve essere preferibilmente realizzato mediante un elemento a varistore con un valore il più vicino possibile alla tensione di esercizio continuo U_C del dispositivo in prova, per garantire risultati comparabili tra i diversi laboratori di prova. I valori massimi per la tensione di circuito aperto di cresta U_{OC} e la corrente di cortocircuito di cresta I_{SC} sono rispettivamente di 20 kV e 10 kA . Al di sopra di questi valori devono essere eseguite prove di classe II. La possibilità di utilizzare reti di disaccoppiamento per i test energizzati dipende dalla progettazione interna dell'SPD, se contiene dei componenti reattivi o a commutazione della tensione.

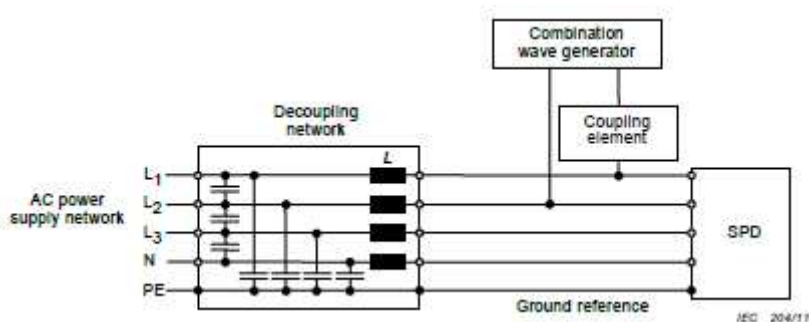


Fig. 10.3 – Esempio di una rete di disaccoppiamento per un sistema di alimentazione trifase.

2. INDELEBILITÀ DEI MARCHI

Questa prova deve essere applicata su marchi di tutti i tipi eccetto quelli realizzati mediante impronta, stampaggio e incisione. La prova si effettua strofinando il marchio a mano per 15 secondi con del cotone imbevuto d'acqua e poi per altri 15 secondi con del cotone imbevuto di solvente alifatico. Al termine del test, i marchi devono essere facilmente leggibili.

3. PROVE ELETTRICHE

3.1 Protezione contro i contatti diretti

Per quanto riguarda le parti isolate: Il campione viene montato come per l'uso normale e la prova viene condotta utilizzando conduttori della sezione trasversale più piccola possibile. Il puntale di prova standard viene applicato in ogni possibile posizione. Un indicatore di continuità elettrica funzionante da una tensione non inferiore a 40 V e non superiore a 50 V, viene collegato da un lato a tutti i terminali in tensione del campione collegati tra loro e dall'altro lato al dito di prova per verificare la possibilità di contatto con qualsiasi parte attiva del campione.

Per quanto riguarda le parti metalliche: Le parti metalliche accessibili quando l'SPD è cablato e montato come per l'uso normale devono essere collegate a terra tramite un collegamento a bassa resistenza. Tra il terminale di terra e ciascuno dei metalli accessibili viene fatta passare una corrente pari a 1.5 volte la corrente nominale di carico o 25 A, a seconda di quale sia la maggiore. Viene misurata la caduta di tensione tra il terminale di terra e la parte metallica accessibile e dalla quale viene calcolata la resistenza, la quale non deve superare 0.05 Ω .

3.2 Corrente residua I_{PE}

L'SPD deve essere collegato come per l'uso normale secondo le istruzioni del costruttore. La tensione deve essere regolata sulla tensione di prova di riferimento U_{REF} . Viene misurata la corrente residua che fluisce attraverso il terminale PE. Il valore della corrente residua misurato non deve superare il valore dichiarato dal costruttore.

3.3 Tensione limite

Per i dispositivi di Classe III si esegue il test con la forma d'onda combinata. Per i dispositivi di Classe I e II si effettua il test con l'impulso di corrente 8/20; se sono presenti dei componenti a commutazione (quali scaricatori a gas, a spinterometri o a tiristori) è necessario anche un test della tensione di innesco.

Prova con impulso di corrente 8/20: Quando si testano SPD di classe I, si usano impulsi di corrente con una sequenza di valori di cresta di circa 0.1/0.2/0.5/1.0 volte il valore di cresta di I_{imp} . Quando si testano SPD di classe II, si fa riferimento alla I_n . Quando I_{max} è dichiarato dal costruttore, deve essere applicato un ulteriore impulso di corrente di 8/20 con un valore di cresta di I_{max} . Una sequenza di polarità positiva e una sequenza di polarità negativa vengono applicate all'SPD con un intervallo tra i singoli impulsi che deve essere sufficientemente lungo da consentire al campione di raffreddarsi a temperatura ambiente. Il

valore per la determinazione di U_{max} è la tensione residua più alta misurata a I_n , I_{max} o I_{imp} , a seconda della classe di prova SPD.

Prova della tensione di innesco: Viene utilizzato l'impulso di tensione 1.2/50. La tensione del generatore è impostata su una tensione di uscita a circuito aperto di 6 kV. All'SPD vengono applicati 10 impulsi, cinque di polarità positiva e cinque di polarità negativa con un intervallo tra i singoli impulsi che deve essere sufficientemente lungo da consentire al campione di raffreddarsi a temperatura ambiente. Se non si osservano interventi durante ciascuno dei 10 impulsi sul fronte dell'onda, allora il test viene ripetuto con la tensione di uscita del generatore aumentata fino a un massimo di 10 kV. Il valore per la determinazione della tensione limite misurata U_{max} è la massima tensione di innesco registrata durante questa prova.

Prova con forma d'onda combinata: Per eseguire questo test viene utilizzato un generatore d'onda combinato. L'intervallo tra i singoli impulsi deve essere sufficientemente lungo da consentire al campione di raffreddarsi a temperatura ambiente. La tensione del generatore d'onda combinato è impostata per fornire una tensione a circuito aperto di 0.1/0.2/0.5/1.0 volte l' U_{OC} dichiarato dal costruttore. Vengono applicati quattro picchi all'SPD per ciascuna ampiezza: due con polarità positiva e due con polarità negativa. Il valore per la determinazione della tensione limite misurata U_{max} è la tensione massima registrata durante questa prova.

3.4 Prova di funzionamento

La prova può variare a seconda del valore di corrente che fluisce attraverso il dispositivo, delle caratteristiche della sorgente e della classe degli SPD. Si tratta di una prova in cui le condizioni di servizio sono simulate applicando all'SPD un numero prestabilito di impulsi specificati mentre è alimentato alla massima tensione di esercizio continuativo U_C tramite una sorgente di tensione alternata.

Corrente pari o inferiore a 500 A: Il campione di prova deve essere collegato a una sorgente di tensione a frequenza industriale. L'impedenza della sorgente di alimentazione deve essere tale che durante il flusso della corrente il valore di cresta della tensione di frequenza di rete, misurata ai terminali dell'SPD, non scenda al di sotto del valore di cresta di U_C per più del 10%.

Corrente superiore a 500 A: Il campione di prova deve essere collegato a una tensione a frequenza industriale pari a U_C con una corrente di cortocircuito presunta pari al valore di interruzione della corrente susseguente dichiarato dal costruttore, o 500 A, a seconda di quale dei due sia maggiore, ad eccezione degli SPD che sono collegati solo tra neutro e terra nei sistemi TT e/o TN, per i quali la corrente di cortocircuito presunta deve essere di almeno 100 A.

Prova di funzionamento per Classe I e II: Devono essere applicati tre gruppi di cinque impulsi di 8/20 impulsi di corrente con polarità positiva. Ogni impulso deve essere sincronizzato con la frequenza di alimentazione. A partire da 0° l'angolo di sincronizzazione deve essere

aumentato a passi di 30° con una tolleranza di $\pm 5^\circ$. L'SPD deve essere alimentato a U_C . Dopo l'applicazione di ciascun gruppo di impulsi e dopo l'interruzione dell'ultima corrente di circolazione (se presente) l'SPD deve rimanere alimentato senza interruzioni per almeno 1 minuto per verificarne la riaccensione. Dopo l'ultimo gruppo di impulsi e il periodo di 1 minuto, l'SPD rimane alimentato per altri 15 minuti per verificarne la stabilità. Tutti gli impulsi di corrente devono essere registrati e non si devono verificare segni di danneggiamento nei campioni. Potrebbero essere applicati dei test addizionali per la Classe I.

Prova di funzionamento per Classe III: L'SPD viene testato con tre gruppi di impulsi corrispondenti a U_{OC} con cinque impulsi positivi iniziati al valore di cresta del semiciclo positivo ($\pm 5^\circ$), cinque impulsi negativi avviati al valore di cresta del semiciclo negativo ($\pm 5^\circ$) e cinque impulsi positivi iniziati al valore di cresta del semiciclo positivo ($\pm 5^\circ$).

3.5 Disconnettori e prestazioni di sicurezza di SPD in sovraccarico

Inizialmente viene effettuata una prova di tenuta alle temperature, mantenendo il dispositivo ad una temperatura di $80^\circ\text{C} \pm 5\text{ K}$ per 24 h.

Successivamente si verifica la stabilità termica.

Per campioni che contengono solamente componenti di limitazione di tensione: I campioni di prova devono essere collegati a una fonte di alimentazione. La tensione deve essere sufficientemente alta da consentire il flusso di corrente attraverso l'SPD. Per questo test, la corrente è impostata su un valore costante. La tolleranza per la corrente di prova è $\pm 10\%$. Il test viene avviato ad un valore di 2 mA r.m.s. per il primo campione, o a U_C , se la corrente di dispersione a U_C supera già 2 mA r.m.s. Questo valore di corrente viene quindi aumentato a passi di 2 mA o del 5 % della corrente di prova precedentemente regolata, a seconda di quale sia maggiore. Per gli altri due campioni il punto di partenza deve essere modificato da 2 mA a una corrente corrispondente a 5 gradini al di sotto del valore di corrente a cui il primo campione si è disconnesso. Ogni fase viene mantenuta fino al raggiungimento dell'equilibrio termico (cioè variazione di temperatura nel punto più caldo inferiore a 2 K entro 10 min). Se la tensione ai capi dell'SPD scende al di sotto di U_{REF} durante il test, la regolazione della corrente viene interrotta e la tensione viene riportata a U_{REF} e mantenuta per una durata di 15 minuti. La sorgente deve avere una capacità di corrente di cortocircuito che non limiti la corrente prima che qualsiasi sezionatore intervenga. Il valore massimo della corrente misurata non deve superare la corrente nominale di cortocircuito dichiarata dal costruttore.

Per campioni che contengono componenti a commutazione della tensione in serie con altri componenti: L'SPD è alimentato con una sorgente di alimentazione a U_{REF} e ha una capacità di corrente di cortocircuito che non limiterà la corrente prima che qualsiasi sezionatore si attivi. Il valore massimo della corrente misurata non deve superare la corrente nominale di cortocircuito dichiarata dal costruttore.

In seguito si studia il comportamento alla corrente di cortocircuito, effettuando il test con due diverse impostazioni e due diverse serie di campioni preparati per ogni impostazione.

Prova alla corrente nominale di cortocircuito dichiarata: Il campione è collegato a una sorgente di alimentazione a U_{REF} . Ai morsetti dell'SPD viene regolata la corrente di cortocircuito dichiarata dal costruttore e con il relativo fattore di potenza. La prova viene eseguita due volte con U_{REF} applicato a (45 ± 5) gradi elettrici e a (90 ± 5) gradi elettrici dopo il passaggio per lo zero della tensione. Se interviene un sezionatore interno o esterno sostituibile o ripristinabile, il relativo sezionatore deve essere sostituito o ripristinato ogni volta. Se non è possibile sostituire o ripristinare il sezionatore, il test viene interrotto.

Prova con una bassa corrente di cortocircuito: Si applica per 5 s una sorgente tensione a U_{REF} , con una corrente di cortocircuito di cinque volte la corrente nominale della protezione di massima corrente (se dichiarata dal costruttore) con il relativo fattore di potenza. Se il produttore non richiede una protezione da sovracorrente esterna, viene utilizzata una corrente di cortocircuito presunta di 300 A. La prova viene eseguita una volta con U_{REF} applicato a (45 ± 5) gradi elettrici dopo il passaggio per lo zero della tensione.

Infine potrebbero essere applicati dei test addizionali per SPD con una corrente di interruzione minore della corrente di cortocircuito nominale dichiarata, o per simulare la modalità di guasto dei dispositivi.

3.6 Resistenza di isolamento

Il trattamento dell'umidità viene eseguito in una cabina di umidificazione con un'umidità relativa del $93 \% \pm 3 \%$. La temperatura dell'aria è mantenuta entro ± 2 K ad una temperatura adeguata compresa tra 20 °C e 30 °C. Dopo un ritardo compreso tra 30 min e 60 min dopo il trattamento di umidità, la resistenza di isolamento viene misurata 60 secondi dopo aver applicato una tensione continua di 500 V. La misurazione deve essere eseguita tra tutte le parti in tensione interconnesse e il corpo dell'SPD accessibile al contatto accidentale e tra le parti in tensione del circuito principale dell'SPD e le parti in tensione di circuiti separati isolati, se presenti. La resistenza di isolamento non deve essere inferiore a 5 M Ω nel primo caso e 2 M Ω nel secondo caso.

3.7 Tenuta dielettrica

Gli SPD classificati per uso esterno vengono testati tra i terminali con le parti interne rimosse. Gli SPD classificati per uso interno sono testati come indicato nella prova per la resistenza di isolamento. Gli SPD sono testati con una tensione alternata secondo la Fig. 10.4. A partire da non più della metà della tensione richiesta, questa viene aumentata al valore pieno entro 30 s e viene mantenuto per 1 min. Non devono verificarsi archi o perforazioni, tuttavia si accettano scariche parziali se la variazione di tensione durante la scarica è inferiore al 5%.

SPD continuous operating voltage V	AC test voltage kV
$U_c \leq 100$	1,1
$100 < U_c \leq 200$	1,7
$200 < U_c \leq 450$	2,2
$450 < U_c \leq 600$	3,3
$600 < U_c \leq 1\ 200$	4,2
$1\ 200 < U_c \leq 1\ 500$	5,8

Fig. 10.4 – Tabella di riferimento per il test di tenuta dielettrica.

Il trasformatore di potenza utilizzato per le prove deve essere progettato in modo tale da generare una corrente di cortocircuito di almeno 200 mA dopo aver cortocircuitato i terminali. Un relè di sovracorrente, se presente, reagisce solo se la corrente del circuito di prova supera i 100 mA. Il dispositivo per misurare la tensione di prova deve avere una precisione di $\pm 3\%$.

3.8 Comportamento in caso di sovratensioni temporanee

Per le sovratensioni causate da guasti nella rete di bassa tensione: Gli SPD devono essere provati utilizzando i valori di sovratensione temporanea U_T riportate nelle tabelle corrispondenti, o le tensioni dichiarate dal costruttore, a seconda di quali siano superiori. I nuovi campioni devono essere utilizzati e montati come nell'uso normale. Il campione di prova deve essere collegato a una tensione di frequenza di rete di U_T tra $+0$ e -5% per una durata t_T tra $+5$ e -0% . Immediatamente dopo l'applicazione di U_T , una tensione pari a U_{REF} tra $+0$ e -5% con la stessa capacità di corrente, deve essere applicata al campione di prova per un periodo di 15 min. L'intervallo di tempo tra i periodi di prova deve essere il più breve possibile e comunque non superiore a 100 ms.

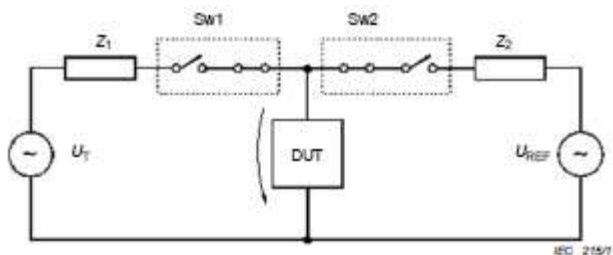


Fig. 10.5 – Esempio di un circuito di prova per il test di comportamento in caso di sovratensioni temporanee in reti di bassa tensione.

Per le sovratensioni causate da guasti nella rete di alta (o media) tensione: Gli SPD collegati a PE e destinati all'uso sui sistemi di distribuzione dell'energia devono essere provati utilizzando le tensioni standard di U_T o le tensioni dichiarate dal costruttore, a seconda di quali valori siano superiori. I nuovi campioni devono essere utilizzati e montati come di consueto, secondo le istruzioni del fabbricante, e collegati a un circuito di prova secondo la Fig. 10.6 o equivalente. La tensione di prova U_T tra $+0$ e -5% viene applicata al campione di prova a 90 gradi elettrici della fase L1 chiudendo l'interruttore S1. Dopo il tempo di applicazione l'interruttore S2 si chiude automaticamente. Questo collega il terminale PE

dell'SPD al neutro (tramite il resistore di limitazione della corrente R2) cortocircuitando l'avvolgimento secondario del trasformatore T2. Ne consegue il funzionamento del fusibile F2 a protezione del trasformatore. La corrente di cortocircuito presunta del generatore per U_{REF} deve essere pari a cinque volte la corrente nominale della protezione di massima corrente dichiarata dal costruttore, oppure 300 A se non viene dichiarata la protezione di massima corrente. La tolleranza per la corrente è +10/-0%.

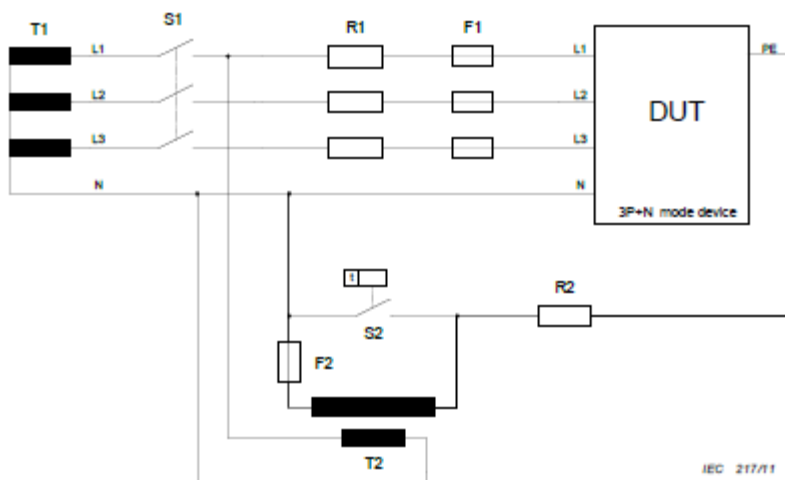


Fig. 10.6 - Esempio di un circuito di prova per il test di comportamento in caso di sovratensioni temporanee dovute a guasti in reti di alta (o media) tensione.

4. PROVE MECCANICHE

4.1 Affidabilità di viti, parti sottoposte a corrente e connessioni

Le viti sono serrate e allentate dieci volte per viti con una filettatura di materiale isolante o cinque volte in tutti gli altri casi. Viti o dadi con filettatura di materiale isolante vengono completamente rimossi e reinseriti ogni volta a meno che la costruzione della vite non lo impedisca. Durante la prova, i collegamenti a vite non devono allentarsi e non devono esserci danni, come la rottura delle viti o danni alle fessure della testa, filettature, rondelle o staffe, che pregiudicherebbero l'ulteriore utilizzo dell'SPD. Gli involucri e le coperture non devono essere danneggiati. Questo deve essere verificato mediante ispezione visiva.

4.2 Terminali per conduttori esterni

Queste prove vengono eseguite con un cacciavite o una chiave adatta applicando una coppia come indicato in tabelle standardizzate. I terminali sono dotati di conduttori in rame, uniformi o intrecciati, a seconda di quale sia meno favorevole. Il conduttore viene inserito nel morsetto per la distanza minima prescritta o, ove non sia prescritta, fino a che non sporga appena dal lato opposto, e nella posizione più idonea a favorire la fuoriuscita del filo. Le viti di fissaggio vengono quindi serrate con una coppia adeguata. Ciascun conduttore viene quindi sottoposto ad un tiro che viene applicato senza strappi, per 1 min, nella direzione degli assi dello spazio del conduttore. Durante questa prova, il conduttore non deve muoversi in modo evidente nel terminale.

4.3 Verifica degli spazi d'aria e della distanza di dispersione

Le distanze d'aria e di dispersione non devono essere inferiori ai valori indicati nelle tabelle standardizzate. Le misure vengono eseguite senza conduttori oltre che con conduttori di sezione maggiore indicata dal costruttore. Si presume che dadi e viti con testa smussata si trovino nella posizione di serraggio meno favorevole. Se è presente una partizione, la distanza d'aria viene misurata attraverso la partizione; dove la partizione è costituita da due parti che non sono unite tra loro, il gioco d'aria viene misurato attraverso lo spazio di separazione. Le distanze dovute a fessure o fori nelle parti esterne del materiale isolante sono misurate rispetto a una lamina metallica sulla superficie tangibile. Nel caso in cui sia presente una cavità nel corso della distanza di dispersione, il suo profilo viene considerato solo se è largo almeno 1 mm; le cavità inferiori a 1 mm sono considerate solo nella loro larghezza. Nel caso in cui sia presente una parete divisoria composta da due parti non incollate tra loro, la distanza di dispersione viene misurata attraverso la fessura di separazione. Se le parti metalliche sono ricoperte con resina auto indurente di almeno 2 mm di spessore, o se sono ricoperti da un isolante, non sono necessarie distanze di dispersione e distanze d'aria.

4.4 Resistenza meccanica

Gli SPD devono avere un'adeguata resistenza meccanica in modo da resistere alle sollecitazioni imposte durante l'installazione e l'uso. Dopo la prova il campione non deve presentare danni ai sensi della norma. In particolare le parti in tensione non devono diventare accessibili con il puntale di prova standard. Si trascurano i danni alla finitura caratterizzati da piccole ammaccature che non riducono le distanze di dispersione e piccole scheggiature che non pregiudicano la protezione contro scosse elettriche o dannose infiltrazioni d'acqua. Le crepe non visibili normalmente, senza ulteriore ingrandimento, e le crepe superficiali nelle modanature rinforzate con fibre e simili vengono ignorate.

4.5 Prove ambientali e del materiale

Viene verificata la resistenza all'ingresso di oggetti solidi o dannose infiltrazioni d'acqua, la resistenza al calore, la pressione sulle parti esterne dell'SPD in materiale isolante, la resistenza al calore anormale e al fuoco, la resistenza di tracciamento.

4.6 Prove aggiuntive per specifici design di SPD

È possibile che vengano eseguite delle prove aggiuntive per delle condizioni particolari dei campioni, quali SPD a due o singola porta con terminali di ingresso e uscita separati, SPD per ambienti esterni, SPD con circuiti isolati separati, SPD di tipo cortocircuitale.

4.7 Prove aggiuntive per specifiche prestazioni

È possibile che, in caso siano dichiarate dal costruttore, vengano eseguite delle prove aggiuntive per specifiche caratteristiche del campione, quali la corrente totale di scarica per SPD a multipoli, la caduta di tensione, la capacità di tenuta alla scarica lato carico, la derivata dell'aumento di tensione du/dt .

PROVE DI ROUTINE

Durante la produzione vengono eseguiti test appropriati per verificare che l'SPD sia in grado di soddisfare le sue prestazioni. Il costruttore deve dichiarare i metodi di prova.

PROVE DI ACCETTAZIONE

Le prove di accettazione vengono effettuate previo accordo tra produttore e acquirente. Quando l'acquirente specifica le prove di accettazione nel contratto di acquisto, le prove seguenti devono essere eseguite sul numero intero inferiore più vicino alla radice cubica del numero di SPD da fornire. Qualsiasi modifica del numero dei campioni o del tipo di prova deve essere accordata tra il produttore e l'acquirente. Se non diversamente specificato, sono indicate come prove di accettazione le seguenti prove:

- a) verifica dell'identificazione mediante ispezione;
- b) verifica della marcatura mediante ispezione;
- c) verifica dei parametri elettrici.

11. TEST ESEGUITO IN LABORATORIO

Nel laboratorio di alta tensione dell'Università di Padova, è stato testato il comportamento agli impulsi di alcuni componenti che possono essere trovati sul mercato. Per la prova è stato utilizzato un generatore combinato. Esso produce una forma d'onda di tipo 1.2-50 quando i morsetti sono a vuoto, mentre produce una forma d'onda di tipo 8-20 quando i morsetti sono collegati in cortocircuito. La relazione tra le ampiezze di tensione e corrente è di 1/0.5 (con una tensione di 10 kV si avrà una corrente di 5 kA) e l'impedenza interna è di 2 Ω . Il generatore è composto da una capacità di 8 μF che viene caricata attraverso un generatore a tensione continua. La capacità viene poi scaricata per mezzo di uno spinterometro. Il circuito è inoltre provvisto di resistenze e un'induttanza che rappresentano l'impedenza del generatore combinato, al fine di produrre l'onda di corrente voluta. È presente un grosso resistore con lo scopo di limitare la corrente all'interno del circuito. La corrente viene misurata attraverso un trasformatore di corrente per alta frequenza, con un rapporto di 25 mV/1 A, il quale viene collegato all'oscilloscopio per la visualizzazione della forma d'onda. La tensione invece viene misurata con l'utilizzo di un divisore di tensione resistivo. A protezione dell'oscilloscopio sono stati inseriti degli attenuatori resistivi, con un'impedenza di 50 Ω .

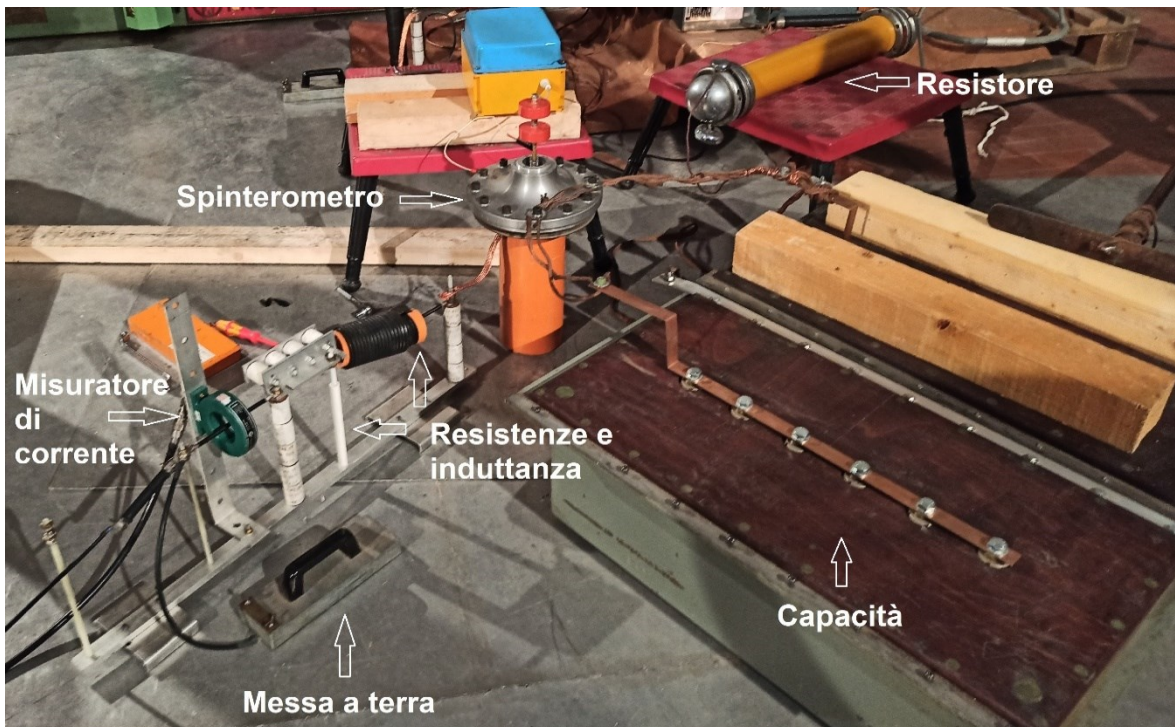


Fig. 11.1 – Disposizione dei componenti del generatore combinato in laboratorio



Fig. 11.2 – Divisore di tensione.

- Per prima cosa è stata fatta una prova in cortocircuito, per verificare che l'andamento della forma d'onda di corrente rispettasse quello richiesto. Il risultato è un impulso di corrente 8-20 μs con un valore di picco di circa 5 kA.

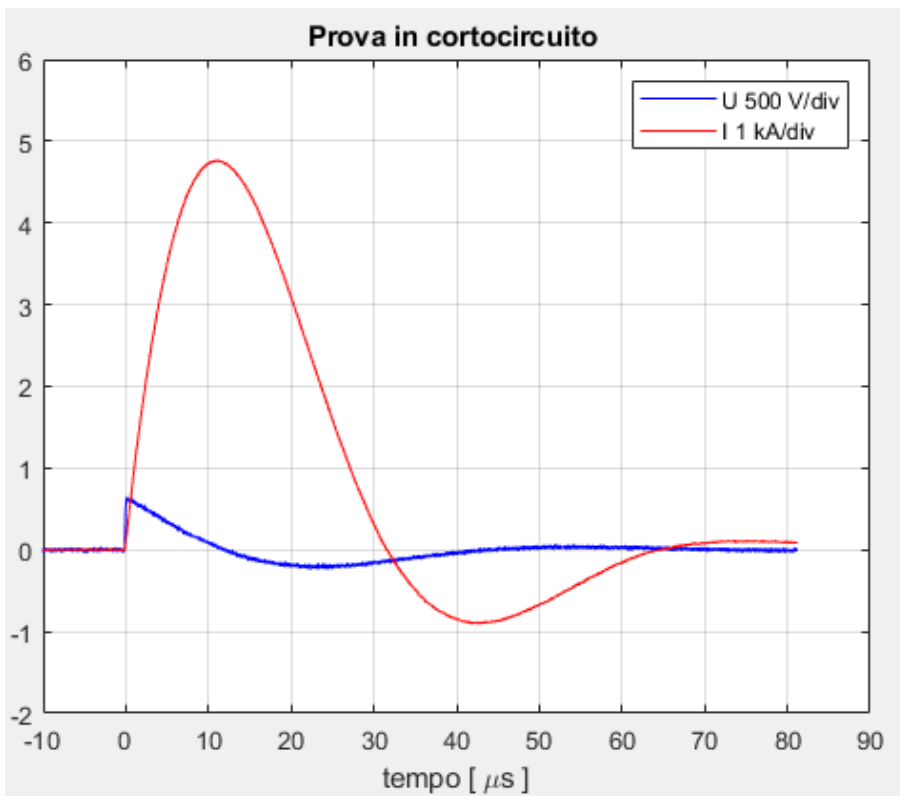


Fig. 11.3 – Prova in cortocircuito.

- Successivamente è stato testato il primo oggetto, uno scaricatore di sovratensione Kleinhuis Arnocanali a varistori per rete 230/400V, Classe II:
 - U_n : 230 V
 - I_{sn} : 15 kA
 - U_p : 1.2 kV
 - U_{max} : 275 V

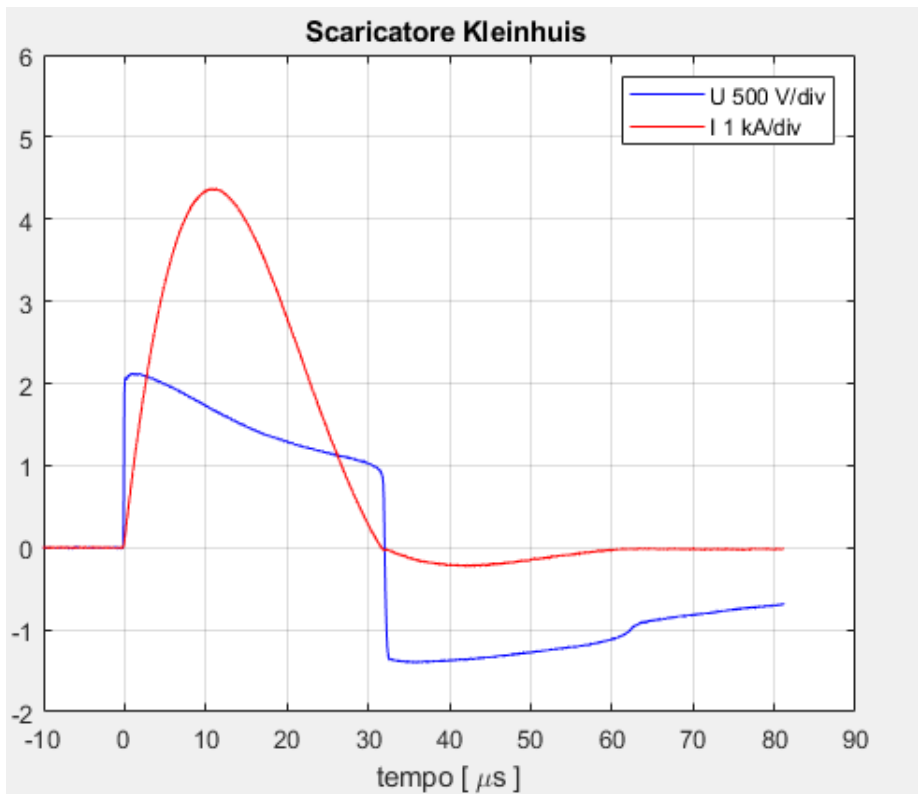


Fig. 11.4 – Intervento dello scaricatore Kleinhuis.

Da questo grafico si nota come la tensione venga limitata dallo scaricatore. La forma è quella tipica dovuta all'intervento di un varistore. Nel tratto di semionda negativa si può identificare un secondo intervento del dispositivo.

- Il secondo oggetto è uno scaricatore di sovratensione Soulé per rete 400 V:
 - U_n : 400 V
 - I_{sn} : 20 kA
 - U_p : 1.8 kV
 - U_C : 440 V

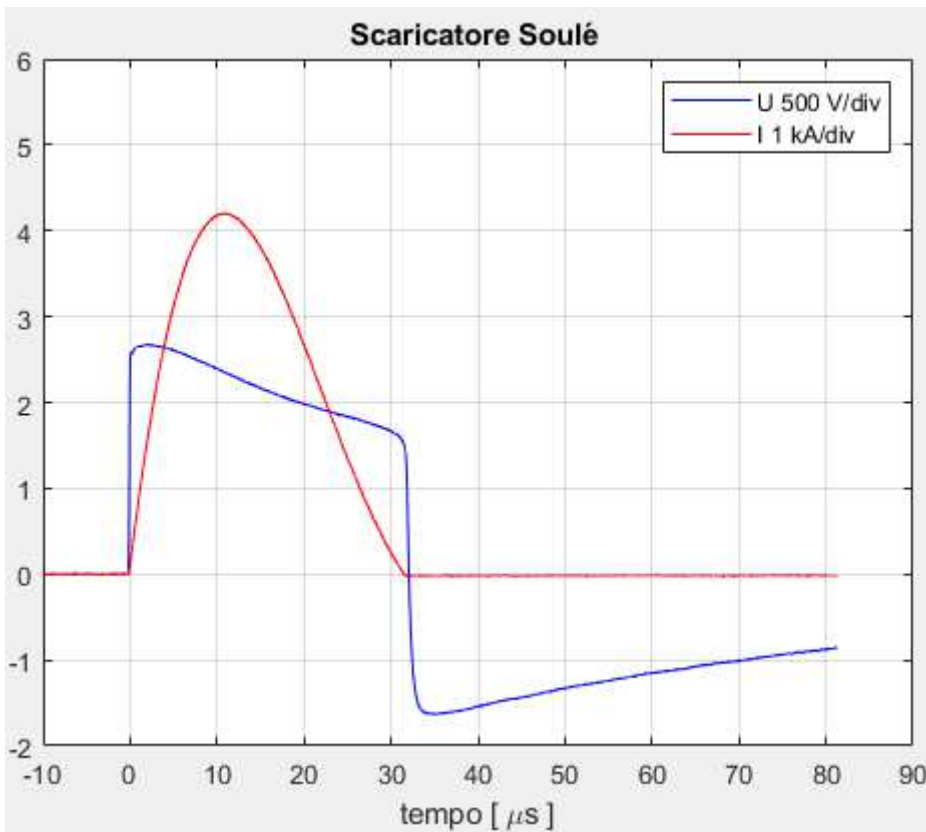


Fig. 11.5 – Intervento dello scaricatore Soulé.

La curva della tensione non si discosta molto dall'andamento della prova precedente, anche se si osserva un sensibile aumento del valore di picco di tensione. Inoltre la semionda negativa dovuta all'impulso non è attenuata, rispetto al caso precedente, questo vuol dire che la tensione di intervento era superiore alla tensione residua del generatore, di conseguenza lo scaricatore non è intervenuto una seconda volta.

- La terza prova è stata eseguita con uno scaricatore Siemens Siov-B60K1000, per rete di media tensione:
 - U_n : 1100 V_{RMS} / 1465 V_{DC}
 - I_{max} : 70 kA

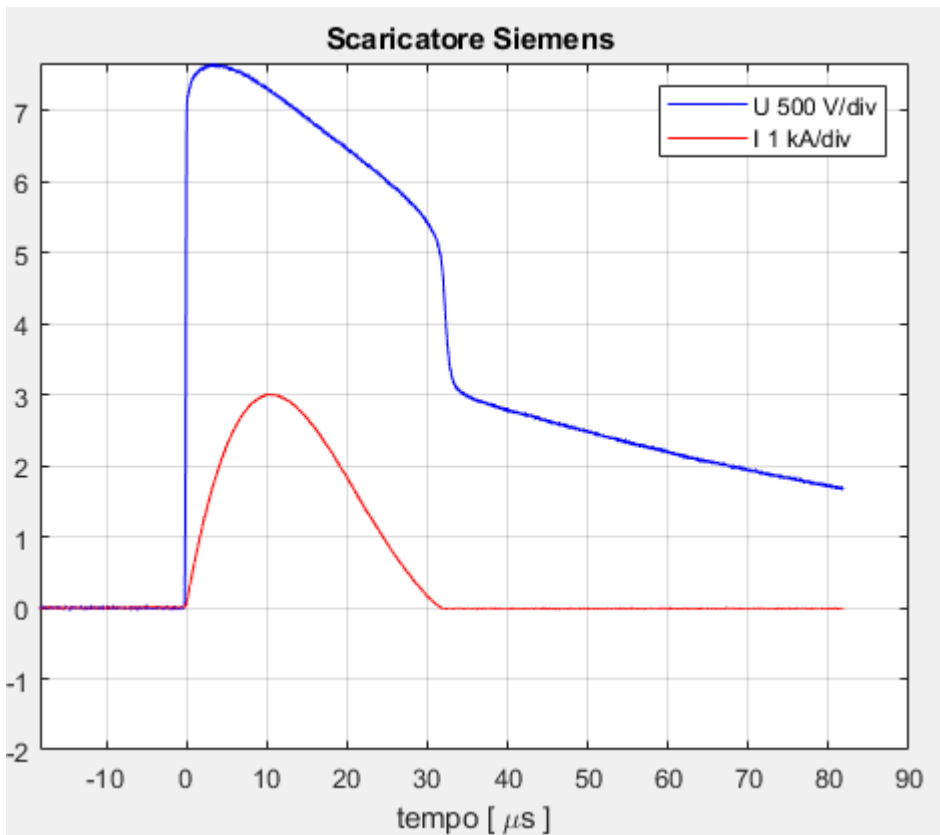


Fig. 11.6 – Intervento dello scaricatore della Siemens per reti MT.

Come ci si poteva aspettare la curva della tensione raggiunge valori molto più elevati rispetto ai casi precedenti, poiché il dispositivo è progettato per impianti a tensione nominale maggiore. Chiaramente non sarebbe adatto per la protezione di una rete di bassa tensione.

- Il quarto dispositivo è un limitatore di sovratensioni a diodi bidirezionale, Littelfuse AK6 – 380C:
 - V_R : 380 V (*Reverse standoff Voltage*)
 - V_C : 520 V (*Max Clamp Voltage*)
 - I_{pp} : 6 kA (*Maximum peak pulse current*)



Fig. 11.7 – Littelfuse AK6.

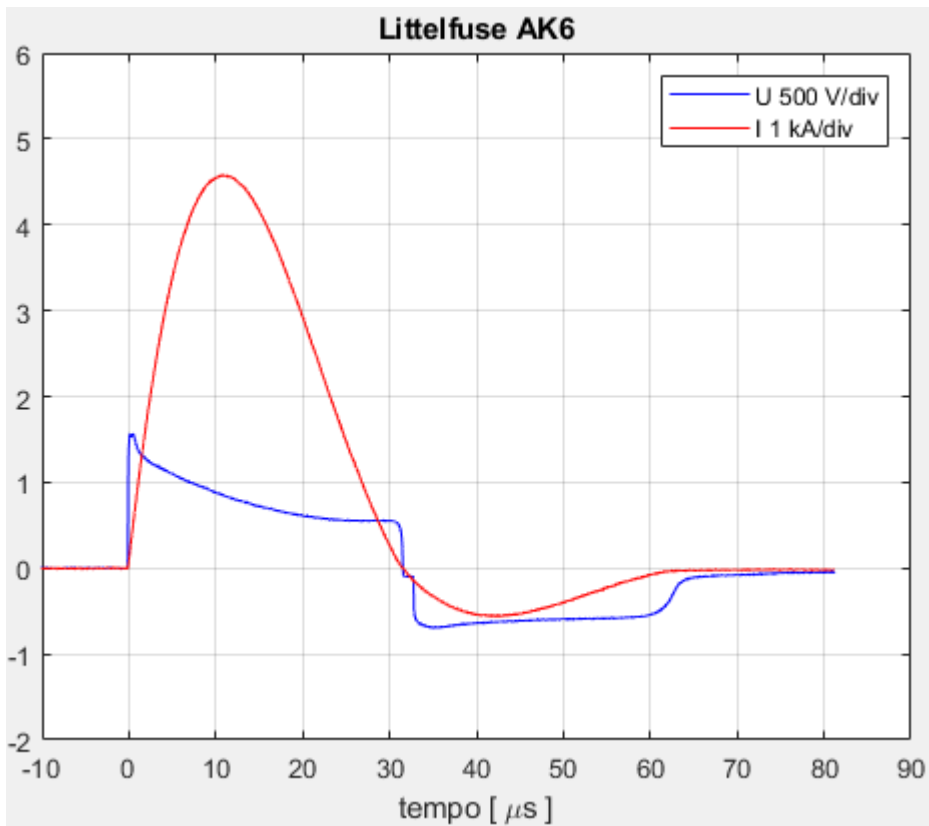


Fig. 11.8 – Intervento del limitatore Littelfuse AK6.

Rispetto ai casi precedenti si osserva una notevole diminuzione del valore di picco della tensione, e la forma d'onda appare più attenuata e dolce. Il dispositivo è intervenuto in modo speculare anche nella regione della semionda negativa di corrente, mantenendo i livelli di tensione a valori accettabili per la rete.

- Per la quinta prova è stato testato un altro dispositivo a diodi della Littelfuse, serie 5KP - 30CA:
 - V_R : 30 V (*Reverse standoff Voltage*)
 - V_C : 48.4 V (*Max Clamp Voltage*)
 - I_{pp} : 105.4 A (*Maximum peak pulse current*)

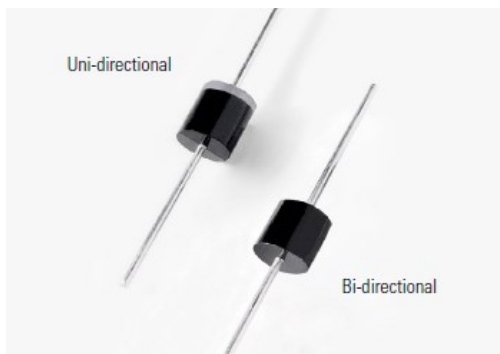


Fig. 11.9 – Littelfuse 5KP30CA, nelle due versioni unidirezionale o bidirezionale.

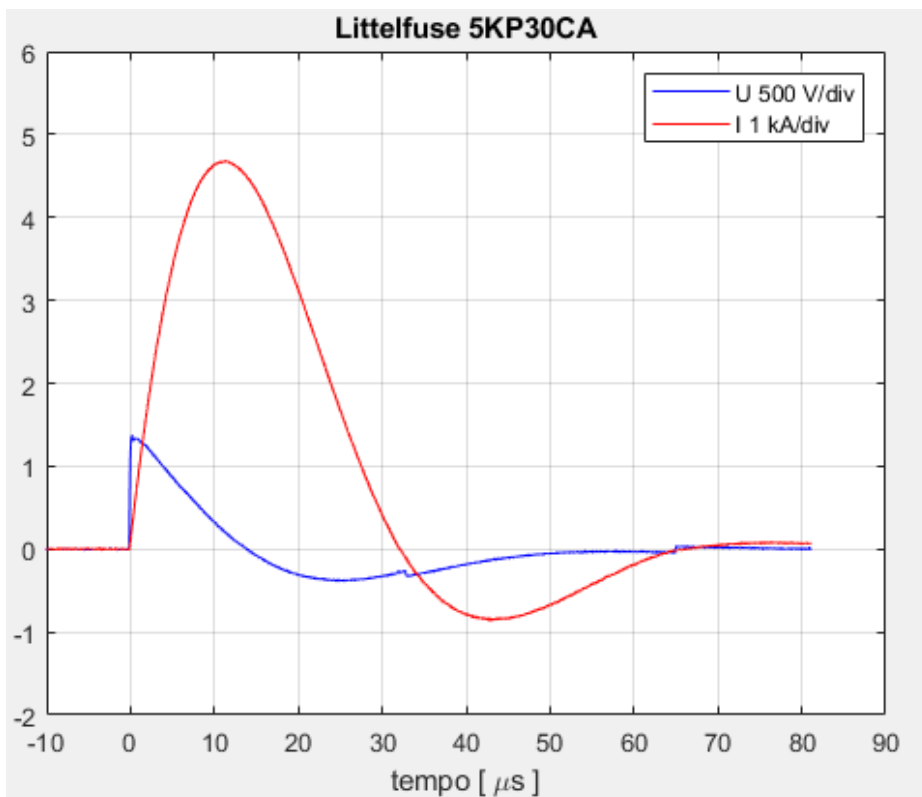


Fig. 11.10 – Intervento del limitatore a diodi Littelfuse 5KP30CA.

Questo dispositivo è dimensionato per una tensione inferiore rispetto al precedente, infatti è visibile un effetto di limitazione dell'onda molto marcato. La tensione viene portata addirittura a valori negativi, questo è dovuto all'effetto dell'induttanza del circuito (L) e la derivata negativa della forma d'onda di corrente (di/dt).

- L'ultimo componente che è stato testato con lo stesso tipo di impulso di corrente è uno scaricatore a gas, Littelfuse AC240:
 - V_{BD} : 1100 V (a 100 V/μs) / 1200 V (a 1 kV/μs) (*Impulse breakdown*)
 - I_n : 5 kA, 10 scariche (8/20 μs) (*Nominal Impulse Discharge Current*)



Fig. 11.11 – Littelfuse AC240.

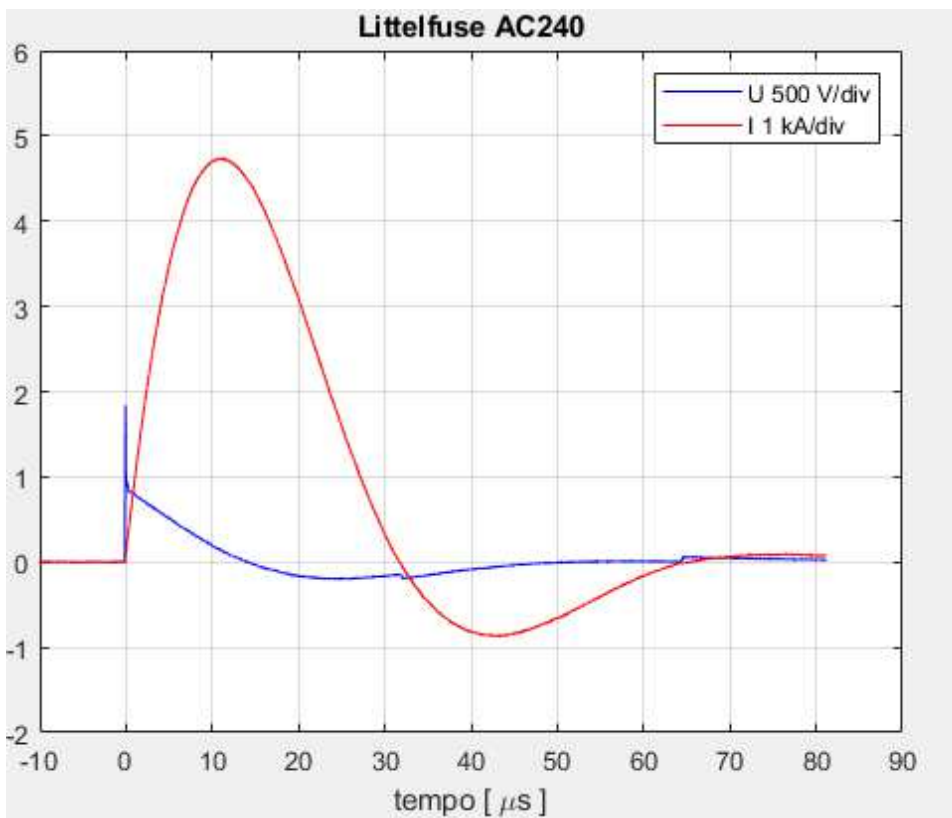


Fig. 11.12 – Intervento dello scaricatore a gas Littelfuse AC240.

Questo è il comportamento tipico di uno scaricatore a commutazione. In questo caso il dispositivo tenderebbe a portare il valore di tensione a zero. Nell'oscilloscopio si nota una piccola variazione, probabilmente dovuta al cablaggio del circuito in sede di prova ed a eventuali disturbi, che possono portare a delle cadute di tensione apprezzabili.

- Infine è stato testato il dispositivo DEHN Blitzductor – BVT TC 1, un limitatore di sovratensione per la protezione delle reti dati di Classe II:
 - U_C : 170 V (*Tensione massima continuativa DC*)
 - I_n : 5 kA (*Corrente nominale di scarica complessiva – 8/20 μs*)
 - Z_L : 4.7 Ω (*Impedenza longitudinale per filo*)



Fig. 11.13 – SPD Classe II, Blitzductor - BVT TC 1.

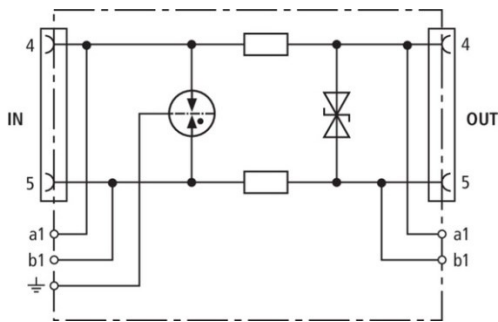


Fig. 11.14 – Schema circuitale del dispositivo Blitzductor – BVT TC 1.

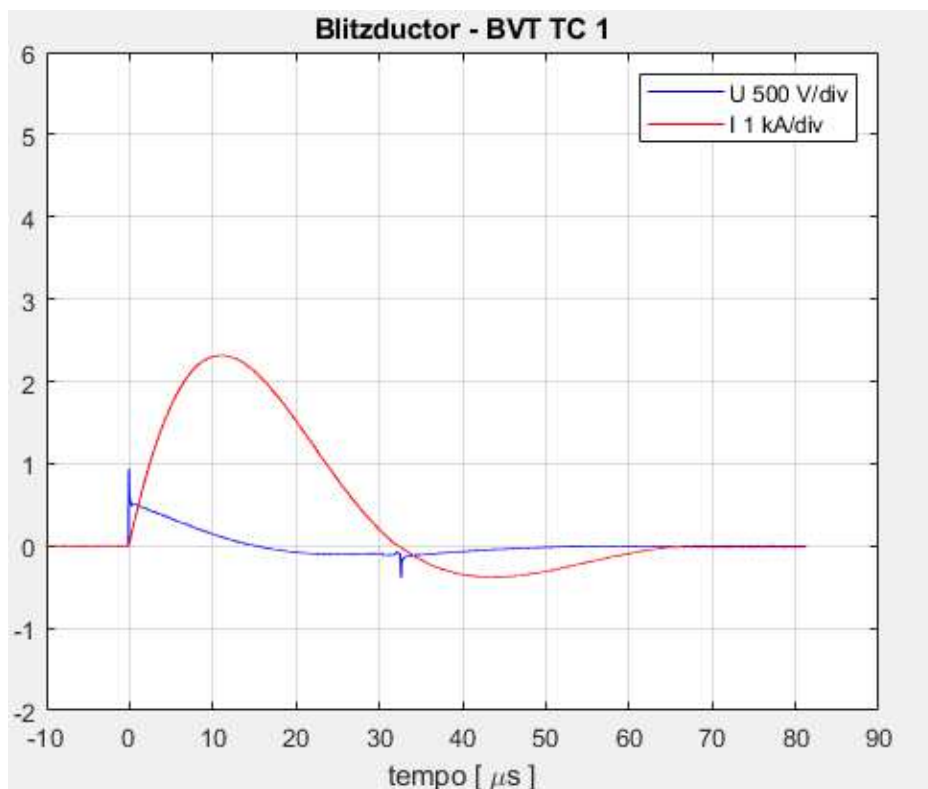


Fig. 11.15 – Intervento del limitatore di sovratensione Dehn, Blitzductor – BVT TC 1.

In questo caso il valore di picco dell'onda di corrente impulsiva è stato abbassato a poco meno di 2.5 kA, dal momento che il dispositivo in prova è dimensionato per una corrente di scarica minore dei precedenti, essendo progettato per proteggere una rete dati, più sensibile di un generico impianto elettrico di bassa tensione. Dal grafico si nota come il livello di tensione in uscita rimanga sempre confinato entro bassi valori, non superando mai i 500 V, e portato quasi a zero, anche a seguito di un secondo intervento nella semionda negativa della corrente.

12. CONCLUSIONI

Lo studio effettuato ha portato ad una maggiore consapevolezza nell'ambito della sicurezza di un impianto elettrico, a partire dalle reti di trasmissione in alta tensione, passando per le grandi centrali fotovoltaiche, che stanno via via acquistando una sempre maggior importanza nel panorama energetico internazionale, arrivando infine direttamente nelle abitazioni private. È stata analizzata la differenza che intercorre tra i diversi tipi di dispositivi che possono essere trovati in commercio al giorno d'oggi; appare infatti chiaro come sia sempre necessario uno studio preliminare per la progettazione di un qualsiasi impianto, mettendo in evidenza non solo la zona in cui dovrà essere installato, comportando un'adeguata analisi dei rischi, ma anche i livelli di tensione che devono essere tenuti sotto controllo per garantire l'incolumità di persone e oggetti, con uno sguardo più attento verso i dispositivi elettronici e le loro relative linee dati. La sperimentazione svolta nel laboratorio ha permesso di avere un riscontro pratico sui comportamenti dei dispositivi in seguito alla sollecitazione dovuta ad una scarica elettrica intensa, si è visto quindi come le diverse caratteristiche di protezione influiscano sui livelli di tensione, rendendo il lettore consapevole del perché in alcuni casi sia preferibile uno specifico componente piuttosto che un altro. È anche per questo motivo che nei cataloghi delle grandi aziende produttrici di limitatori di sovratensioni, i dispositivi sono organizzati in modo chiaro ed evidente con diversi colori in base al loro utilizzo, *Red Line* per apparecchi di protezione per rete di energia e *Yellow Line* per rete informatica e di telecomunicazione.

Si può dunque concludere che, concedendo il giusto spazio in sede di progettazione a questi dispositivi di protezione, è possibile aumentare la durata e la qualità della vita non solo degli impianti elettrici, ma di tutto il complesso che li circonda. È quindi ragionevole assumere che i limitatori di sovratensione siano un investimento per migliorare sia l'ambiente lavorativo sia quello domestico, aumentando la sicurezza verso quegli eventi che non sempre possono essere previsti ed evitati.

BIBLIOGRAFIA

ABB, *OVR – Guida pratica per la protezione contro le sovratensioni*, 2011.

DEHN + SÖHNE – BLITZPLANER® - *Manuale per la protezione contro i fulmini*, Terza edizione, 2016.

ABB, *OVR data and telecom SPDs – Surge Protective Devices for data and telecommunication systems*, 2016.

SIEMENS, Volker Hinrichsen, *Metal-Oxide Surge Arresters in High-Voltage Power Systems - Fundamentals*, 3rd edition, 2012.

Abdullah Munir, Zulkurnain Abdul-Malek, Umbrin Sultana, Rai Naveed Arshad, *A novel technique for condition monitoring of metal oxide surge arrester based on fifth harmonic resistive current*, Electric Power Systems Research 202 (2022) 107576.

Jinlou Shen, Shenglin Jiang, Yuchun Xu, Mingyu Li, Shuai Zhu, Zhibiao Chen, Xiafang Lin, Huan Liu, Honglang Li, Guangzu Zhang, *Boron and sodium co-doped ZnO varistor with high stability of pulse current surge*, Journal of Alloys and Compounds 728 (2017) 368-375.

BSI Standards Publication - BS EN 61643-11:2012+A11:2018 - *Low-voltage surge protective devices - Part 11: Surge protective devices connected to low-voltage power systems - Requirements and test methods*, 2018.