

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Elettrica

Tesi di Laurea Magistrale

Progettazione di un laboratorio per la verifica delle prove ad impulso



**POLITECNICO
DI TORINO**

Relatori

Prof. Enrico Pons

Prof. Pietro Colella

Candidato

Enrico Stuerdo

Dicembre 2018

Indice

Acronimi	5
Introduzione	6
1 Sovratensioni negli impianti elettrici	8
1.1 Aspetti generali sulle Sovratensioni	8
1.2 Sovratensioni di origine atmosferica	11
1.3 Sovratensioni interne	14
1.3.1 Sovratensioni di manovra	14
1.3.2 Sovratensioni per risonanze	15
1.3.3 Sovratensioni per diminuzione del carico	15
1.4 Protezioni contro le sovratensioni	17
1.4.1 Protezione mediante filtri nell'alimentatore	17
1.4.2 Protezione mediante varistori (MOV)	17
1.4.3 Protezione mediante scaricatori a gas (GDT)	18
1.4.4 Protezione mediante soppressori di transitori di tensione (TVS) . .	19
1.4.5 Protezione mediante limitatori di sovratensione (SPD)	19
1.4.6 Protezione mediante rinforzo degli isolamenti	20
2 Prove di sovratensione secondo la normativa	21
2.1 Allestimento della prova	21
2.1.1 Strumenti di misura	22
2.1.2 Generatore di impulsi	24
2.1.3 Rete di accoppiamento e disaccoppiamento	26
2.2 Taratura strumenti	28
2.2.1 Generatore di impulsi	28
2.2.2 Rete di accoppiamento/disaccoppiamento	28
2.3 Esecuzione della prova	29
2.4 Requisiti di sicurezza per il laboratorio secondo la CEI 50191	32
2.4.1 Stazioni di prova con protezione automatica contro i contatti diretti	34
2.4.2 Stazioni di prova prive di protezione automatica contro i contatti diretti	35

3	Laboratorio di sovratensioni del DENERG del Politecnico di Torino	36
3.1	Laboratorio DENERG	37
3.2	Interventi da effettuare nel laboratorio	40
3.2.1	Soluzioni per stazioni di prova prive di protezione automatica contro i contatti diretti	43
3.3	Strumenti di misura	45
3.3.1	Generatore di impulsi	45
3.3.2	Altri strumenti già presenti nel laboratorio	48
3.3.3	Rete di accoppiamento e disaccoppiamento	49
4	Progettazione della rete di accoppiamento/disaccoppiamento	50
4.1	Componenti da progettare	52
4.1.1	Rete di accoppiamento	52
4.1.2	Rete di disaccoppiamento	52
4.1.3	Resistenze e reattori necessari	54
4.2	Simulazione della rete CDN	55
4.2.1	Effetti del carico sull'impulso di tensione	55
4.2.2	Effetti del carico sull'impulso di corrente	58
4.2.3	Effetti dell'induttore di disaccoppiamento sull'impulso di corrente verso rete	60
4.2.4	Effetti dell'induttore di disaccoppiamento sulla forma d'onda di tensione verso rete	63
4.2.5	Tensioni e correnti di picco di ciascun componente	65
4.3	Generalità componenti reattivi	67
4.3.1	Condensatore	67
4.3.2	Induttore	70
4.4	Ricerca di mercato	73
4.4.1	Condensatore di disaccoppiamento	73
4.4.2	Induttore di disaccoppiamento	74
4.4.3	Condensatore di accoppiamento	75
4.5	Trasformatore di disaccoppiamento	77
	Conclusioni	78
	Elenco delle tabelle	80
	Elenco delle figure	81
	Bibliografia	83
	Allegati	84
	Allegato A Procedura di prova per la verifica di tenuta all'impulso	85
A.1	Collegamento della strumentazione	85
A.2	Verifica della strumentazione	88
A.3	Esecuzione della prova	88

Elenco abbreviazioni ed acronimi

Elenco abbreviazioni ed acronimi utilizzati nell'elaborato:

- EUT - Elemento di prova (*Equipment Under Test*)
- CDN - Rete di accoppiamento/disaccoppiamento (*Coupling Decoupling Network*)
- MOV - Varistore (*Metal Oxide Varistor*)
- GDT - Scaricatore a gas (*Gas Discharge Tube*)
- TVS - Soppressore di transitori di tensione (*Transient Voltage Suppression*)
- SPD - Limitatore di sovratensione (*Surge Protection Device*)

Introduzione

La norma CEI 61000 4-5 fornisce indicazioni relative ai vincoli di sicurezza e alla procedura di prova da applicare per la verifica dei test di tenuta all'impulso.

Per poter effettuare prove di sovratensione è necessario disporre di un laboratorio che rispetti i requisiti di sicurezza e in cui sia presente la strumentazione per poter attuare la procedura di prova e registrare i risultati in uscita in maniera accurata.

All'interno della normativa viene prescritto che l'elemento di prova si trovi nel suo normale funzionamento durante le prove di tenuta all'impulso, questo porta con sé problematiche ulteriori in quanto viene richiesta la presenza di due elementi aggiuntivi:

- una rete di accoppiamento in grado di fornire l'impulso all'elemento di prova limitando il flusso di corrente dalla rete al generatore;
- una rete di disaccoppiamento che offra un'impedenza elevata alla forma d'onda di impulso ma consenta alla corrente di normale funzionamento di circolare verso l'elemento di prova.

Per poter effettuare i test è inoltre necessario l'utilizzo di un generatore di sovratensioni. Questo dovrà essere in grado di fornire un impulso di tensione del tipo $1,2/50 \mu s$, in grado cioè di produrre una sovratensione con fronte di tensione in circuito aperto di $1,2 \mu s$ e durata della tensione a circuito aperto di $50 \mu s$.

Il laboratorio per i test di sovratensione presente nel DENERG del Politecnico di Torino è dotato di un generatore VCS500N10 in grado di emettere impulsi di tensione fino ad un massimo di 10 kV. Questo strumento permette di effettuare le prove di tenuta all'impulso sugli elementi di prova, ma è necessario definire gli elementi ausiliari necessari per poter ampliare le possibili prove.

Finora è stato possibile effettuare solamente prove direttamente sui componenti per verificarne la tenuta all'impulso. All'interno di questo elaborato andrò a definire i componenti necessari e la loro connessione per poter effettuare le prove sui dispositivi (lampade, circuiti elettronici, ecc.) mentre questi sono alimentati dalla rete, quindi durante il loro normale funzionamento.

Nasce il problema della progettazione di una rete di accoppiamento e di una di disaccoppiamento tali da permettere l'esecuzione della prova senza che si arrivi a danni sul generatore o verso la rete di alimentazione.

Nella parte finale dell'elaborato è stata svolta una ricerca di mercato per poter eventualmente acquistare direttamente i componenti reattivi necessari ad ottenere questi risultati. Viene fornita così un'alternativa all'acquisto della rete di accoppiamento/disaccoppiamento vendibile dal costruttore del generatore, quest'ultima sicuramente più accurata ma anche molto più costosa.

Capitolo 1

Sovratensioni negli impianti elettrici

1.1 Aspetti generali sulle Sovratensioni

Le sovratensioni rappresentano la principale causa di guasto dei dispositivi elettronici e di interruzione dell'attività produttiva. Le sovratensioni più pericolose sono causate da fulminazioni, da manovre elettriche sulla rete di distribuzione e da interferenze parassite.

Oggi in tutti i settori (residenziale, commerciale e industriale) sono utilizzate apparecchiature elettroniche, sistemi informatici, sistemi di automazione e di controllo alimentati dalla rete di distribuzione dell'energia elettrica. Un guasto ad uno di questi sistemi può portare ad avere perdite di operatività, di servizio, di dati o di produttività comportando così costi di gran lunga superiori al costo delle apparecchiature di protezione contro le sovratensioni.

La società di assicurazioni britannica AVIVA ha effettuato numerosi studi riguardanti i motivi che portano al guasto di un'apparecchiatura elettronica. Facendo riferimento ad utenti residenziali, ha condotto in Francia uno studio statistico che ha portato ad ottenere che più della metà dei danni alle apparecchiature elettroniche sono causati da sovratensioni; i risultati sono esposti in Figura 1.1.

Allo stesso tempo è importante notare come:

- I sistemi elettronici sono sempre più diffusi, anche in ambito domestico (computer, reti informatiche, apparecchiature per le telecomunicazioni, ecc.); i danni da sovratensione sono di importanza fondamentale in un mondo in cui sono aumentate drasticamente le applicazioni che affidano il loro funzionamento alle reti di distribuzione elettrica ed ai sistemi informatici.
- Le apparecchiature elettroniche sono sempre più sensibili a causa del processo di miniaturizzazione dei circuiti e dei componenti, le apparecchiature sono quindi più soggette ad essere danneggiate dalle sovratensioni.
- Le reti di distribuzione e di telecomunicazione sono sempre più interconnesse e complesse; nelle città molto popolate, gli effetti indotti dalle scariche elettriche da fulminazione si possono propagare per diversi chilometri.

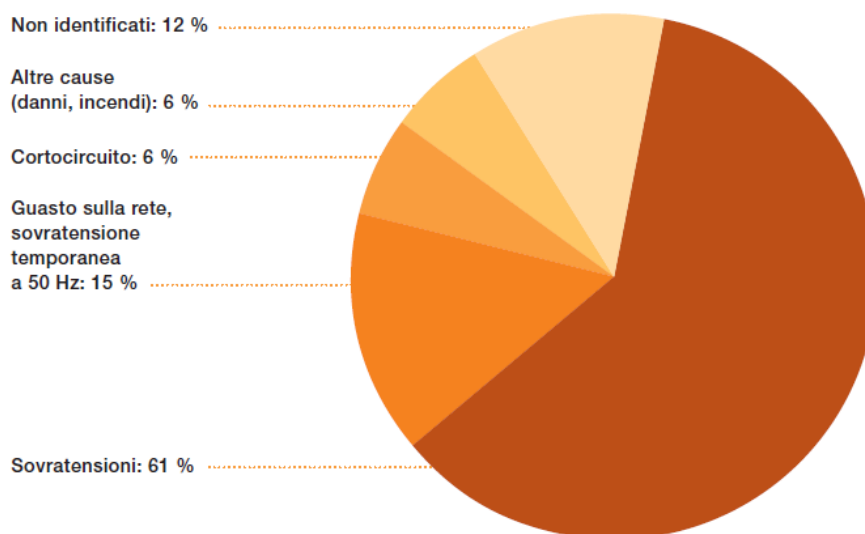


Figura 1.1: Danni apparecchiature elettroniche AVIVA

A seconda delle condizioni di esercizio, un impianto elettrico presenta valori di tensione variabili nel tempo. Queste variazioni possono verificarsi tra punti diversi del sistema (ad esempio tra fase e fase o tra fase e terra) o fra punti dello stesso sistema (come tra le spire di uno stesso avvolgimento).

Definita una tensione nominale possiamo indicare la fascia di ammissibilità come le tensioni comprese nell'intervallo $0.9 V_n$ e $1.1 V_n$. Possiamo inoltre definire:

$$V_{mn} = 1.1 V_n \quad (1.1)$$

$$V_{maxn} = \sqrt{2} V_{mn} \quad (1.2)$$

come massimo valore efficace e il massimo valore istantaneo della tensione concatenata di esercizio [1]. Viene detta sovratensione ogni valore di tensione superiore al valore massimo istantaneo ammissibile.

In condizioni anomale la tensione può raggiungere valori molto maggiori di quelli massimi di esercizio ammessi, con tempi lunghi o brevi a seconda della casistica.

Dal punto di vista delle cause possiamo distinguere le sovratensioni in due macrocategorie:

- Sovratensioni atmosferiche, provocate da fenomeni elettrici esterni all'impianto;
- Sovratensioni interne, cioè originate da componenti dell'impianto o a seguito di manovre effettuate su di esso.

In via generale non è possibile definire una forma d'onda univoca delle sovratensioni perché queste possono essere di diverso tipo. Per caratterizzarle si fa in genere riferimento al suo valore massimo, al suo spettro armonico ed alla durata complessiva.

Associato al valore massimo è consuetudine definire il fattore di sovratensione k come il rapporto tra il valore massimo V_{max} della sovratensione e il massimo valore istantaneo della tensione di esercizio $V_{max,n}$:

$$k = \frac{V_{max}}{V_{max,n}} \quad (1.3)$$

Per quanto riguarda la durata, sono in genere più pericolose le sovratensioni di durata molto breve (dell'ordine dei millisecondi). Le sovratensioni si propagano lungo l'impianto, modificando il proprio andamento e interessando i vari punti del sistema anche con tempistiche differenti. In generale la forma d'onda si attenua durante la propagazione a causa delle resistenze presenti, vi possono però essere fenomeni di rifrazione e riflessione che portano ad uno schema di propagazione molto più complesso.

Soprattutto per gli impianti a tensione elevata, le sovratensioni sono la causa principale di guasto in un impianto elettrico, possono provocare il cedimento dell'isolamento e dar vita a fenomeni che portano alla distruzione dell'elemento colpito o di quelli vicini [1].

Riguardo la provenienza delle sovratensioni possiamo distinguere due casistiche a seconda che questa provenga dalla rete elettrica o sia invece generata dall'ambiente a causa dell'accumulo di cariche elettrostatiche [2]:

- Sovratensioni provenienti dalla rete elettrica

Possono avere origine a causa di fenomeni atmosferici anche in parti lontane dell'impianto di alimentazione o distribuzione, possono interessare l'apparecchio in due modi:

1. Sovratensioni di modo comune

L'impulso di tensione si verifica tra i conduttori di alimentazione che assumono così entrambi lo stesso potenziale verso terra. Questo non comporta normalmente guasti interni al componente ma la sovratensione viene trasferita al circuito secondario dove possono nascere problematiche ulteriori.

2. Sovratensioni di modo differenziale

La sovratensione si verifica tra conduttori di diversa polarità (come tra un conduttore di fase e il neutro) e porta a guasti nel circuito primario e, se la sovratensione è elevata, porta a danni anche ai componenti vicini.

- Sovratensioni generate dall'ambiente mediante accumulo di carica

Sull'involucro dell'apparecchio possono accumularsi cariche elettrostatiche se questo è esposto all'azione del vento o dell'ambiente circostante. E' quanto si verifica con apparecchi illuminanti da esterno in presenza di temporali ed è particolarmente rilevante quando la custodia degli apparecchi è metallica e privo di collegamenti verso terra.

1.2 Sovratensioni di origine atmosferica

Le sovratensioni di origine atmosferica si verificano in occasione delle fulminazioni.



Figura 1.2: Scarica di origine atmosferica

I fulmini più visibili sono di certo quelli fra nuvola e suolo, ma si possono anche osservare fulmini fra due nuvole o addirittura scariche all'interno della stessa nuvola.

Per classificare un fulmine, è necessario tenere in considerazione da dove ha inizio la scarica e qual è la sua polarità. Si distinguono tre tipi di fulmini [3]:

- Fulmine discendente negativo (nube-terra): la scarica pilota parte dall'alto e ha carica negativa. Il primo colpo di fulmine sarà caratterizzato da una corrente con valori compresi fra i 2 e i 200 kA. Generalmente, in seguito alla prima scarica, essendo il canale ionizzato ormai “aperto”, le successive sono caratterizzate da un minor contributo energetico.
- Fulmine discendente positivo: la scarica pilota parte dall'alto e ha carica positiva. I fulmini positivi si originano dalle cariche positive posizionate sulla sommità della nuvola, i fulmini positivi sono contraddistinti da un canale di scarica molto lungo, che rende più difficile il passaggio di altra corrente e quindi il generarsi di scariche successive.
- Fulmine ascendente: la scarica pilota parte dal basso, in particolare il canale di origine può derivare da strutture naturali come alberi, ma anche da strutture artificiali come tralicci, entrambi caratterizzati da un'altezza elevata. Così come per i fulmini discendenti negativi, una volta ionizzato il canale, saranno possibili scariche successive di pari intensità.

Il fulmine tra nube e terreno si verifica a causa della presenza di cariche positive in alto e negative in basso tali da provocare un campo elettrico superiore alla rigidità dielettrica dell'aria. Si verifica così una prima scarica leader che procede a scatti dall'alto verso il basso. Avvicinandosi al terreno si ha una scarica luminosa (detta di ritorno) che procede in senso inverso lungo il canale ionizzato prodotto dalla

scarica leader. Dopo la prima scarica avremo altre tre-quattro scariche di andata e ritorno prima che il vento sposti aria fresca nel canale ionizzato.

Una volta valutati i tipi di fulmini possiamo individuare come questi colpiscono l'impianto o l'apparecchiatura considerata:

- Fulminazione diretta dell'edificio



Figura 1.3: Fulminazione diretta edificio

Se l'edificio è dotato di impianto parafulmine, il fulmine viene scaricato a terra portando in tensione l'impianto di terra e tutto ciò a cui esso è collegato.

- Fulminazione indiretta dell'edificio



Figura 1.4: Fulminazione indiretta edificio

Le sovratensioni sono generate dal campo magnetico associato alla corrente di fulmine che si concatena alle parti metalliche conduttrici dell'edificio.

- Fulminazione diretta sulla linea



Figura 1.5: Fulminazione diretta linea

La corrente di fulmine viene partizionata in parti uguali nei due sensi, passa attraverso il trasformatore MT/BT e genera delle sovratensioni su tutto ciò che è collegato verso terra.

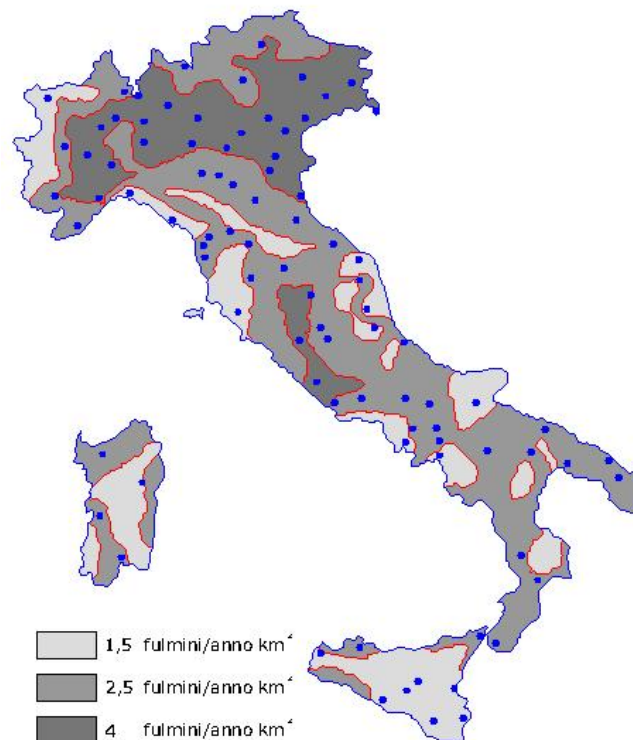
- Fulminazione indiretta sulla linea



Figura 1.6: Fulminazione indiretta linea

Le sovratensioni indotte, che hanno ampiezza variabile tra i 3 e i 5 kV, non hanno energia sufficiente per innescare l'incendio, ma possono distruggere le apparecchiature.

Le probabilità di fulminazione sono diverse da regione a regione, in Italia il servizio di statistica sulle fulminazioni è gestito dal CESI (Centro Elettrotecnico Sperimentale Italiano) che fornisce mappe di densità isoceraunica per ogni provincia.



www.cdm1880.it

MAPPA DI FULMINAZIONE DELL' ITALIA (CEI)

Figura 1.7: Densità di fulmini per zona geografica

1.3 Sovratensioni interne

Le sovratensioni interne hanno come causa scatenante un evento connesso al funzionamento di una parte dell'impianto. Rispetto alla sovratensione da fulmini, hanno un minore contenuto energetico, ma si manifestano con molta più frequenza e sono dannose in quanto generate direttamente nella rete di alimentazione. La loro breve durata, il brusco fronte di salita e il valore di cresta (che può raggiungere diversi kV), portano al logorio prematuro delle apparecchiature elettroniche.

Fra le sovratensioni interne assumono particolare rilevanza le sovratensioni di manovra dovute alla modifica dello stato di un interruttore presente nell'impianto. Altri fenomeni come la brusca variazione di un carico portano a variazioni di tensione di tipo oscillatorio, poco smorzate e con contenuto armonico poco differente dalla frequenza nominale.

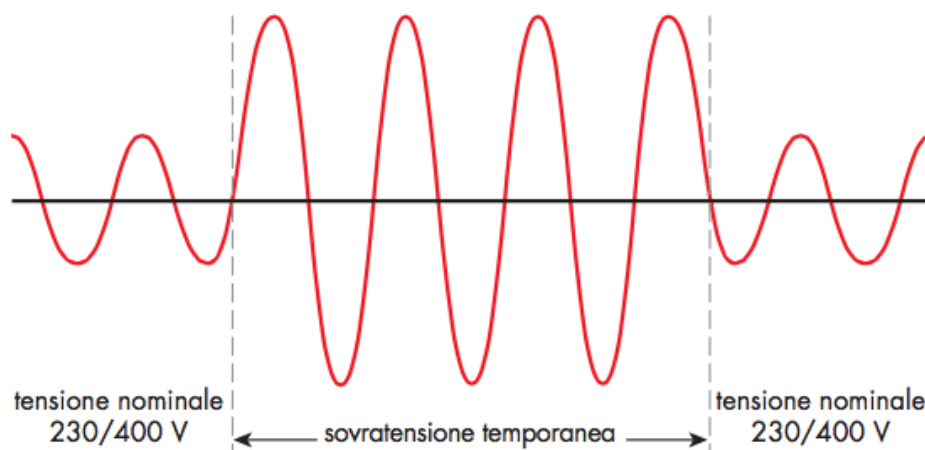


Figura 1.8: Andamento sovratensione transitoria

1.3.1 Sovratensioni di manovra

L'apertura o la chiusura di un interruttore percorso da corrente porta ad avere sovratensioni con oscillazioni smorzate e contenuto armonico che si può estendere dalla frequenza industriale (50 Hz) fino a qualche migliaio di Hz. Il fronte d'onda presenta tempi di durata compresi tra 0,1 e 10 μs ed una coda di diversi ms.

Il valore massimo di queste sovratensioni dipende dalla tensione nominale di funzionamento, dalle caratteristiche del circuito considerato e dall'istante in cui viene comandata l'interruzione.

Per sistemi ad altissima tensione (oltre i 380 kV) le sovratensioni di manovra possono essere considerate persino più pericolose di quelle atmosferiche e diventano quindi l'elemento principale per la determinazione delle caratteristiche dell'isolamento. Le sovratensioni di manovra più pericolose si hanno in corrispondenza dell'interruzione di correnti in circuiti induttivi o per l'apertura di circuiti capacitivi.

1.3.2 Sovratensioni per risonanze

Nei circuiti in cui convivono effetti capacitivi ed induttivi (ad esempio un sistema in cui siano presenti un trasformatore con delle batterie di rifasamento o dei cavi schermati) è soggetto a fenomeni di risonanza. Normalmente le frequenze di risonanza sono lontane dalla frequenza fondamentale e quindi non si verifica il fenomeno, può però accadere che a seguito di inquinamento armonico qualche armonica vada a sollecitare una frequenza di risonanza portando ad effetti potenzialmente pericolosi anche per piccoli valori di energia.

In particolare sono pericolose le componenti di terza armonica che sono presenti a causa della non linearità dei circuiti magnetici o per le distorsioni introdotte dai dispositivi per la conversione statica. questi componenti possono sollecitare in maniera consistente i condensatori di rifasamento se questi presentano frequenze di risonanza vicine alla terza armonica.

Possono verificarsi fenomeni di risonanza anche a seguito di guasti. Ad esempio per un guasto a terra di una fase su una linea a neutro isolato che alimenta un trasformatore, ciò che si viene a creare è un circuito risonante che comprende le capacità parassite delle fasi sane e l'induttanza saturabile della fase guasta. In caso di risonanza si possono generare sovratensioni tra le fasi sane e la terra che portano anche a scariche verso terra.

1.3.3 Sovratensioni per diminuzione del carico

Se consideriamo una linea di grosse dimensioni, una diminuzione brusca del carico porta ad un innalzamento della tensione nel punto di alimentazione del carico in quanto viene a mancare la caduta di tensione sull'impedenza interna del generatore equivalente e sulla linea. Nel caso in cui le capacità distribuite sulla linea superino le reattanze induttive si viene a creare una situazione in cui la tensione finale può essere superiore a quella di ingresso. Questo fenomeno è anche conosciuto come Effetto Ferranti.

In casi particolarmente critici (come il brusco annullamento di un carico su una lunga linea di trasmissione AT) la sopraelevazione di tensione può anche superare il valore iniziale del 20%. In questi casi però intervengono i regolatori di tensione per diminuire la tensione iniziale limitando così la sovratensione.

La diminuzione del carico, se non è bilanciata da una corrispondente regolazione della potenza attiva tramite un regolatore di velocità, può portare ad un aumento della velocità di rotazione degli alternatori e quindi ad un aumento della tensione iniziale.

Dal punto di vista delle sovratensioni, la fulminazione diretta è quella che comporta il rischio più elevato. In Figura 1.9 abbiamo un confronto tra le varie forme di sovratensione in cui viene confermato quanto detto finora:

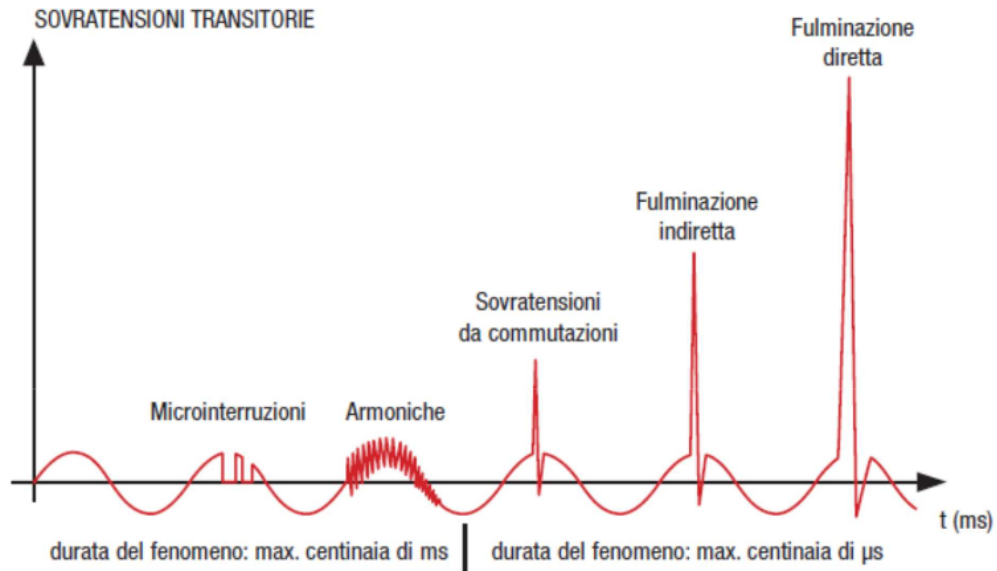


Figura 1.9: Confronto tra le sovratensioni

1.4 Protezioni contro le sovratensioni

Per garantire la protezione degli apparecchi elettronici è necessario intraprendere misure in grado di prevenire o limitare le sovratensioni. In seguito verranno elencate delle metodologie di protezione che possono raggiungere questo obiettivo pur con alcune criticità.

Per alcuni dispositivi sarà comunque necessaria una protezione ausiliaria (come un fusibile) nel caso in cui il funzionamento del sistema di protezione superi le sue caratteristiche nominali.

1.4.1 Protezione mediante filtri nell'alimentatore

Le unità di alimentazione elettroniche sono normalmente munite di filtri posti sul lato primario o sul secondario in uscita per garantire la protezione contro le sovratensioni di modo differenziale. Questi filtri possono essere dimensionati per sopportare livelli di tensione relativamente elevati.

In commercio sono presenti unità di alimentazione al cui interno sono inseriti sistemi per la protezione dalle sovratensioni di modo comune, tuttavia occorre tener conto che le capacità parassite interne all'unità di alimentazione possono solamente ridurre (e non annullare) l'impulso di sovratensione. Un elemento che può contribuire ad ottenere ciò è il condensatore posto a monte tra primario e secondario per evitare che i circuiti secondari siano flottanti. Occorre però introdurre ulteriori protezioni contro le sovratensioni di modo comune.

1.4.2 Protezione mediante varistori (MOV)

Il varistore è un componente passivo il cui comportamento è assimilabile ad un resistore non lineare che in presenza di una tensione ai suoi capi superiore a quella prescritta abbassa bruscamente il suo valore di resistenza. Questi dispositivi sono anche indicati con la sigla MOV (*Metal Oxide Varistor*).



Figura 1.10: Esempio di varistore

La tensione oltre la quale si attiva la variazione di resistenza del varistore è detta *clamping voltage*, se si rimane all'interno delle caratteristiche massime del componente il varistore non subisce danni a seguito della sovratensione e può essere quindi utilizzato più volte (a differenza di un fusibile). Se però l'impulso è troppo elevato, il componente può degradarsi sia visivamente sia con degrado non visibile che però modifica le caratteristiche del sistema di sicurezza. Per questo motivo è opportuno inserire un fusibile che intervenga nel momento in cui vengono superati i massimi valori di tensione sopportabili dal varistore, così facendo avremo sicuramente un'indicazione del suo stato di funzionamento.

Per dimensionare accuratamente un varistore è necessario tenere in considerazione i seguenti parametri:

- tensione nominale di lavoro (specificata in AC o DC);
- massima corrente proveniente dall'impulso;
- massima energia assorbibile durante il transitorio di impulso;
- dimensioni fisiche del varistore;
- *derating*, cioè se il varistore è soggetto a più impulsi la corrente sopportabile dal componente deve essere inferiore al caso con singolo impulso.

Ogni transitorio soppresso da un varistore corrisponde ad una dissipazione di potenza al suo interno che ne causa il riscaldamento. La dimensione del varistore dipende quindi dall'ampiezza dei transitori ma anche dalla frequenza di ripetizione.

1.4.3 Protezione mediante scaricatori a gas (GDT)

Uno scaricatore a gas è un dispositivo costituito da due elettrodi posti all'interno di un tubo contenente gas rari. Può essere rappresentato come una resistenza variabile che entro un tempo breve (dell'ordine dei 100 ns) può modificare il proprio valore passando da diversi $G\Omega$ in stato di riposo a valori inferiori ad 1Ω in seguito all'applicazione di una sovratensione.

Viene generalmente collegato a ponte tra due punti con differente potenziale preservando così l'isolamento fino al raggiungimento della tensione di innesco. Una volta raggiunta questa si verifica la riduzione di resistenza e quindi la corrente condotta diminuisce fino a che l'arco elettrico si estingue all'interno dello scaricatore.

Gli scaricatori a gas sono anche chiamati GDT (*Gas Discharge Tube*).

Durante la scarica ad arco la corrente è limitata soltanto dall'impedenza del circuito a cui è collegato lo scaricatore. Questi componenti non devono mai essere collegati direttamente alla rete elettrica per evitare che, in seguito alla scarica, la corrente di cortocircuito vada a creare un arco al plasma che manterrebbe lo stato di cortocircuito anche al termine della sovratensione [2]. Se ciò accadesse si verrebbero a creare temperature elevatissime che potrebbero portare all'incendio.

L'utilizzo di varistori in serie agli scaricatori in genere è la soluzione adottata per prevenire questo fenomeno, sono possibili anche altre soluzioni come dispositivi di protezione integrati all'interno degli scaricatori stessi.

1.4.4 Protezione mediante soppressori di transitori di tensione (TVS)

Il diodo TVS (*Transient Voltage Suppression*) si applica in parallelo all'elemento da proteggere: in condizioni normali presenta un'elevata impedenza lasciando passare solo una piccola corrente di fuga. Uno dei principali vantaggi del diodo TVS è il suo breve tempo di reazione (ps), questa risposta quasi istantanea consente di ridurre l'impulso di tensione molto velocemente aumentando la corrente nel dispositivo.

Il componente però è molto sensibile a tensioni superiori a quelle di progetto, vengono spesso utilizzati in serie ad un'opportuna impedenza che contribuisce a limitarne l'energia. Oltre a questa dovremo poi inserire un fusibile che intervenga nel caso si verifichi un guasto nella giunzione.

1.4.5 Protezione mediante limitatori di sovratensione (SPD)

Un SPD (*Surge Protection Device*) è un dispositivo che contiene almeno un componente non lineare destinato a limitare le sovratensioni transitorie. Sono caratterizzati per corrente che possono sopportare durante la loro azione e tensione di intervento.



Figura 1.11: Esempio di SPD

Un SPD è in grado di offrire protezione sia contro le sovratensioni di modo comune che contro quelle di modo differenziale:

- per la protezione di modo differenziale va collegato tra fase e neutro;
- per la protezione di modo comune va collegato tra i conduttori di alimentazione e la terra.

La protezione contro le sovratensioni viene ottenuta coordinando più SPD posizionati nei vari punti dell'impianto, ad esempio è consigliato montarne uno nel quadro di distribuzione dell'alimentazione e uno in prossimità dell'apparecchio elettronico.

1.4.6 Protezione mediante rinforzo degli isolamenti

Una possibile soluzione consiste nell'aumentare il livello di isolamento tra il dispositivo elettronico e le parti metalliche interne ed esterne accessibili. L'isolamento permette di evitare che la sovratensione vada al dispositivo e quindi lo distrugga.

Deve però essere tenuto presente che la normativa riguardante le prescrizioni di isolamento considerano solo gli aspetti di sicurezza non considerando le prestazioni e la durata.

Capitolo 2

Prove di sovratensione secondo la normativa

Per le prove di sovratensione la norma di riferimento è la CEI 61000 4-5 " *Tecniche di prova e misura - Prova di immunità ad impulso*".

Questa norma si riferisce ai requisiti di immunità, ai metodi di prova e alla gamma dei livelli di prova raccomandati relativi agli impulsi unidirezionali causati da impulsi derivanti da transitori di commutazione e da fulminazioni nelle apparecchiature. Fornisce inoltre indicazioni riguardanti le prove di verifica da effettuare una volta assemblati i vari componenti, in particolare le forme d'onda che devono essere visualizzate per la prova a vuoto effettuata immediatamente prima del test.

Obiettivo della prova di laboratorio è determinare le modalità di risposta dell'apparecchio di prova in condizioni di funzionamento specificate quando è sottoposto ad impulsi di tensione.

Per quanto riguarda invece la messa in sicurezza di un laboratorio elettrico la norma di riferimento è la CEI 50191 che tratta l'Installazione e l'Esercizio degli Impianti Elettrici di Prova.

Verrà inizialmente trattata la parte relativa alla strumentazione necessaria per poter effettuare delle prove di sovratensione specificando i valori di picco richiesti. Successivamente vengono esplicitate le misure di sicurezza richieste all'interno del laboratorio in funzione delle prove richieste e della struttura stessa del locale. La distinzione principale da fare in fase preliminare è tra laboratori in cui è garantita la protezione contro i contatti diretti e quelli in cui invece non è garantita.

2.1 Allestimento della prova

L'allestimento di prova generico è composto dalle seguenti apparecchiature:

- L'apparecchio di prova (EUT, *Equipment Under Test*);
- Apparecchiatura ausiliaria (se richiesta);
- Cavi specificati per gli apparecchi utilizzati;

- Reti di accoppiamento e disaccoppiamento (CDN, *Coupling Decoupling Network*);
- Generatore di forma d'onda combinato;
- Piano di terra di riferimento.

2.1.1 Strumenti di misura

È necessario disporre di un sistema di misura che permetta di registrare l'andamento nel tempo della tensione generata. Un sistema per la misura delle tensioni impulsive è composto da:

1. Un partitore di tensione;
2. Un cavo coassiale per la trasmissione dell'impulso, può essere necessario utilizzare un ulteriore partitore per ridurre la tensione a valori accettati dallo strumento (lunghezza massima cavo 2 metri);
3. Un oscilloscopio.

Viene consigliato un trasduttore (partitore di tensione/corrente) e un oscilloscopio, entrambi devono avere una larghezza di banda e una capacità di tensione/corrente tali da poter gestire la forma d'onda della tensione in circuito aperto e della corrente in cortocircuito.

L'oscilloscopio permette di visualizzare il valore di cresta dell'impulso e di ottenere la sua forma d'onda. E' preferibile utilizzare un oscilloscopio digitale per trasferire i dati su software più potenti, con l'oscilloscopio analogico si rende necessario utilizzare solamente i fotogrammi disponibili e i tempi di elaborazione dei dati diventano più lunghi [6].

Il vantaggio dell'oscilloscopio digitale è che costituisce un sistema di acquisizione dati molto veloce: converte immediatamente i segnali analogici in ingresso in forma digitale caricandoli sulla memoria del sistema utilizzato, da cui poi verranno presi per essere elaborati.

Per misurare tensioni impulsive un oscilloscopio deve avere una risoluzione di almeno 8 bit, larghezza di banda di almeno 10 MHz e una frequenza di campionamento di 100 MS/s. Nel nostro caso per ottenere 30 campioni (che ipotizziamo sufficienti per costruire la forma d'onda) è necessario un intervallo T da 500 ns con velocità di campionamento da 60 MS/s [6].

Tabella 2.1: Caratteristiche richieste all'oscilloscopio

Oscilloscopio	
Risoluzione	8 bit
Larghezza di banda	10 MHz
Frequenza di campionamento	100 MS/s

Per salvare i dati memorizzati dall'oscilloscopio si utilizza l'uscita USB presente su di esso, in tal modo sarà più semplice elaborare i dati su un pc.

Per quanto riguarda i cavi di collegamento, questi devono essere conformi con il generatore e sono scelti in modo da avere proprietà di isolamento elevate. Vengono collegati alle porte HV common output e HV output e andranno direttamente al componente di prova.

In fase preliminare vengono classificati gli ambienti di prova per poter così differenziare i livelli di prova e i generatori necessari:

- Classe 0: ambiente elettrico ben protetto (dentro un ambiente speciale), $V_{IMPULSO} \leq 25 \text{ V}$;
- Classe 1: ambiente elettrico parzialmente protetto, $V_{IMPULSO} \leq 500 \text{ V}$;
- Classe 2: ambiente in cui i cavi sono ben separati, $V_{IMPULSO} \leq 1 \text{ kV}$;
- Classe 3: ambiente in cui i cavi corrono paralleli, $V_{IMPULSO} \leq 2 \text{ kV}$;
- Classe 4: ambiente in cui i cavi di collegamento corrono come cavi esterni insieme a cavi di potenza, i cavi vengono utilizzati sia per circuiti elettrici che elettronici, $V_{IMPULSO} \leq 4 \text{ kV}$;
- Classe 5: ambiente elettrico per apparecchiature elettroniche collegate a cavi di comunicazione e a linee aeree che vanno in aree poco popolate.

Per Classi da 1 a 5 possiamo utilizzare un generatore 1,2/50 μs , se siamo in Classe 4 o 5 con particolari linee di lunghezza superiore ai 300 metri è necessario utilizzare un generatore di impulsi 10/700 μs [4].

2.1.2 Generatore di impulsi

Un generatore di impulsi di tensione $1,2/50 \mu s$ permette di ottenere forme d'onda con le seguenti caratteristiche:

- Un tempo del fronte di tensione in circuito aperto di $1,2 \mu s$;
- Una durata della tensione a circuito aperto di $50 \mu s$;
- Un tempo del fronte di corrente di cortocircuito di $8 \mu s$;
- Una durata della corrente di cortocircuito di $20 \mu s$.

Lo schema circuitale semplificato del generatore è riportato in Figura 3.10:

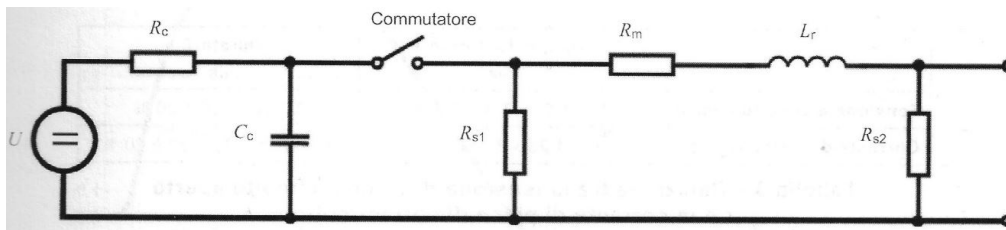


Figura 2.1: Circuito equivalente del generatore

Gli elementi resistivi e reattivi possono essere modificati per passare così da un impulso generato di tensione da $1,2/50 \mu s$ in condizioni di circuito aperto e un impulso di corrente da $8/20 \mu s$ in cortocircuito.

Quando l'uscita del generatore è collegata all'elemento di prova, la forma d'onda di tensione e corrente è legata all'impedenza di ingresso dell'EUT. Questa impedenza varia con il tipo di utilizzatore e di collegamento, può anche subire variazioni nel caso in cui non siano presenti protezioni adeguate e si verifichino bruciature o rotture dei collegamenti o degli eventuali circuiti elettronici.

Occorre che l'impulso proveniente dal generatore arrivi all'elemento di prova con la forma d'onda desiderata, questa dovrà essere verificata in fase preliminare per poter così valutare se siano presenti troppi elementi distrattivi tra le due apparecchiature.

La normativa [4] indica di effettuare le verifiche in circuito aperto e in cortocircuito. Gli andamenti delle forme d'onda ideali sono riportati in Figura 2.2 e Figura 2.3 e fanno riferimento a generatore connesso direttamente al carico senza eventuali reti di accoppiamento o disaccoppiamento connesse tra di essi.

Le caratteristiche del generatore di prova devono essere tarate per verificare queste forme d'onda. L'uscita del generatore deve essere collegata ad un sistema di misura con caratteristiche di banda, tensione e corrente sufficienti a confermare le forme d'onda.

Se si utilizza un trasformatore di corrente per misurare la corrente in cortocircuito dovremo evitare che vada a funzionare nella zona di saturazione del nucleo, la frequenza angolare inferiore della sonda deve essere inferiore ai 100 Hz.

Le caratteristiche del generatore devono essere misurate attraverso un condensatore esterno da $18 \mu F$ collegato in serie all'uscita sia per il caso circuito aperto che per il caso con cortocircuito.

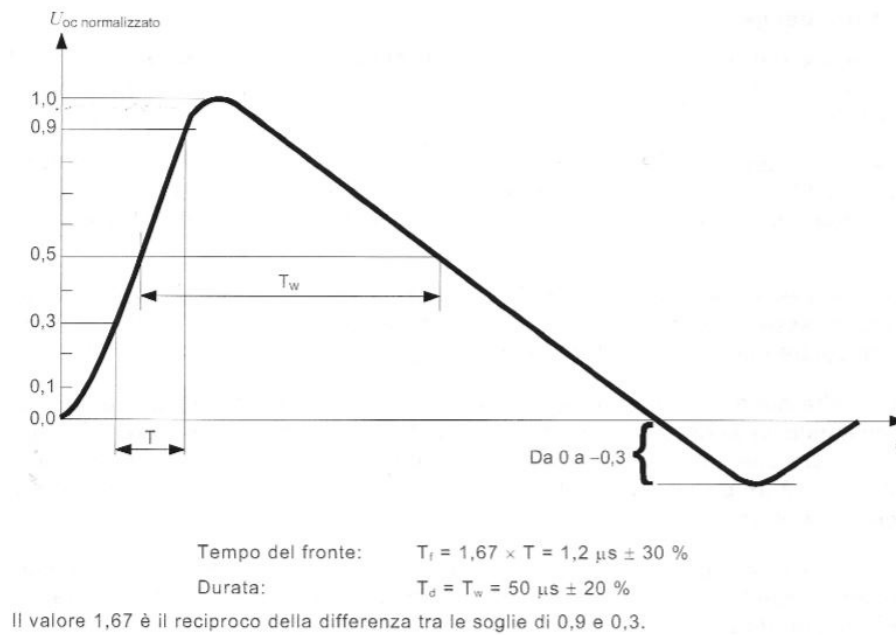


Figura 2.2: Forma d'onda tensione circuito aperto dalla norma CEI 61000 4-5

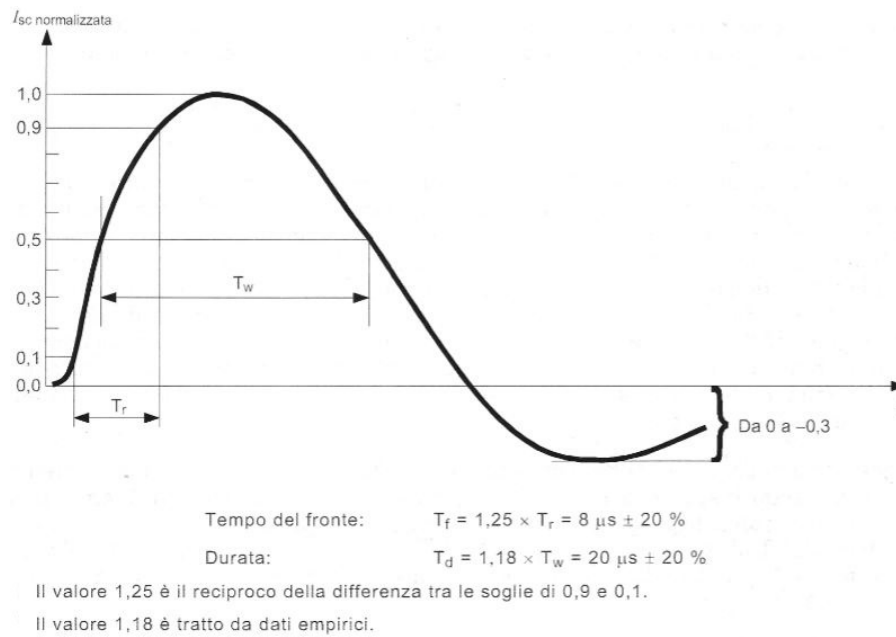


Figura 2.3: Forma d'onda corrente in cortocircuito dalla norma CEI 61000 4-5

2.1.3 Rete di accoppiamento e disaccoppiamento

E' costituita da una rete di accoppiamento e da una di disaccoppiamento:

- La rete di accoppiamento si occupa di fornire l'impulso all'elemento di prova limitando il flusso di corrente dalla rete al generatore;
- La rete di disaccoppiamento sulle linee di alimentazione in alternata o continua offre un'impedenza elevata alla forma d'onda dell'impulso ma consente alla corrente di circolare verso l'elemento di prova.

Come elementi per l'accoppiamento si utilizzano condensatori per l'alta tensione dimensionati per garantire l'accoppiamento tra il generatore e l'EUT per tutta la durata della forma d'onda di prova. Non vengono fornite informazioni riguardo la tipologia di condensatori da preferire ma il valore di capacità e l'eventuale presenza di altri elementi è ben specificata sia in forma grafica che tabellare. A distinguere le due soluzioni possibili è il collegamento del generatore all'elemento di prova, sono possibili due soluzioni:

- Accoppiamento linea-linea;
- Accoppiamento linea-terra.

Per l'accoppiamento linea-linea viene indicato come elemento per l'accoppiamento un unico condensatore da $18\mu F$ mentre per il collegamento linea-terra è necessario utilizzare un condensatore da $9\mu F$ in serie ad una resistenza da 10Ω .

Tabella 2.2: Componenti rete di accoppiamento

Rete di accoppiamento		
Connessione generatore	Condensatore	Resistenza
Linea-Linea	$18\mu F$	-
Linea-Terra	$9\mu F$	10Ω

L'ampiezza di picco, il tempo del fronte e la durata della forma d'onda devono essere verificati per tensione in condizione di circuito aperto e per corrente con morsetti ai capi dell'elemento di prova cortocircuitati. I parametri della forma d'onda in uscita dalla rete di accoppiamento/disaccoppiamento dipendono dall'impulso fornito dal generatore e per essere considerati validi occorre siano verificati in fase preliminare per ogni nuova CDN utilizzata. L'uscita della rete di accoppiamento/disaccoppiamento deve essere collegata ad un sistema di misura con caratteristiche di ampiezza di banda, tensione e corrente sufficienti a verificare l'andamento delle forme d'onda.

L'induttanza di disaccoppiamento deve essere scelta in modo che la caduta di tensione su di essa sia inferiore al 10% della tensione in ingresso alla CDN stessa con corrente nominale. In generale la normativa indica di non superare il valore di 1.5 mH per ciascun induttore utilizzato, questo deve essere ridotto se lavoriamo con correnti elevate: fino a 16 A di corrente nominale è consigliabile lavorare con 1.5 mH, se la corrente aumenta nettamente è necessario diminuire il valore degli induttori utilizzati.

Tabella 2.3: Componenti rete di disaccoppiamento

Rete di disaccoppiamento	
Componenti utilizzati	Condensatori e Induttori
Vincoli	Caduta di tensione massima sul filtro Massimo valore induttore 1,5 mH

La rete di disaccoppiamento è assimilabile ad un filtro passa basso LC, mentre però per l'induttore la normativa dà informazioni specifiche, per il condensatore ciò non accade. Essi però vengono regolarmente rappresentati negli esempi di CDN forniti dalla normativa. L'unica informazione generale ottenibile dalla normativa riferita alle capacità è che esse devono essere dimensionate in realzione alla frequenza ed alla corrente di esercizio. Mentre per l'induttore questo diminuiva al crescere della corrente richiesta dall'EUT, l'opposto accade per la capacità di disaccoppiamento.

Sulla normativa possiamo trovare i due schemi di collegamento delle reti di accoppiamento e disaccoppiamento per il caso linea-linea e linea-terra:

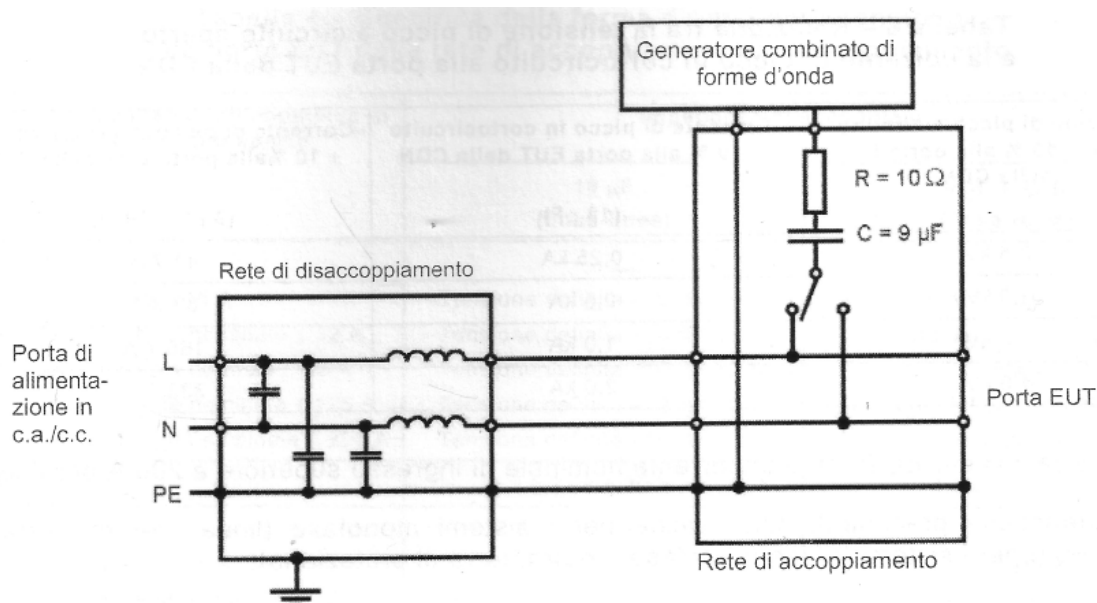


Figura 2.4: Connessione Linea-Terra secondo la Norma CEI 61000 4-5

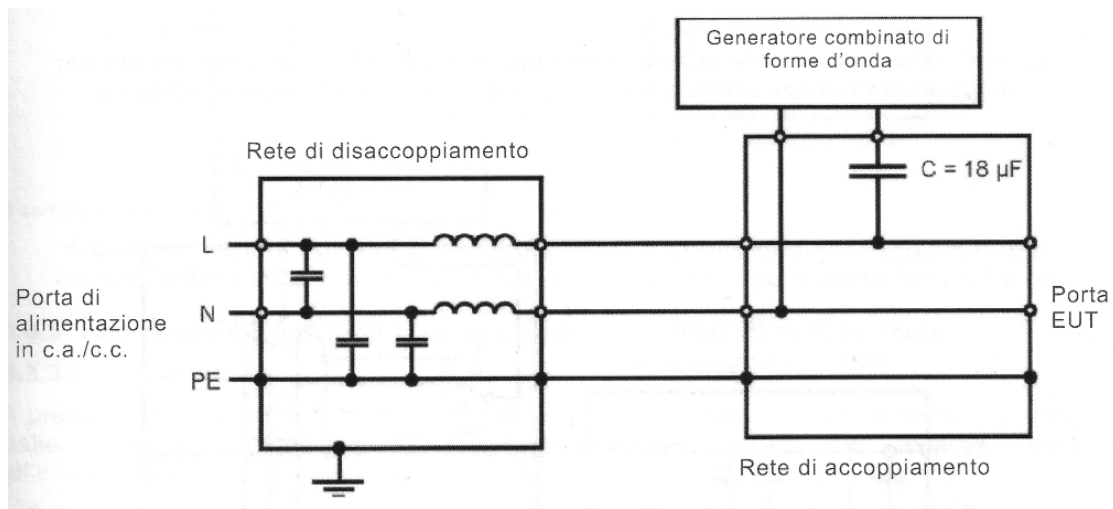


Figura 2.5: Connessione Linea-Linea secondo la Norma CEI 61000 4-5

2.2 Taratura strumenti

2.2.1 Generatore di impulsi

Il generatore deve essere tarato per stabilire il rispetto delle prescrizioni della norma CEI 61000 4-5, questa fornisce anche la procedura da seguire.

Per prima cosa i morsetti di uscita del generatore devono essere collegati ad un sistema di misura con caratteristiche di larghezza di banda, tensione e corrente sufficienti a controllare le caratteristiche delle forme d'onda.

Nel caso in cui si scelga un trasformatore di corrente per misurare la corrente di cortocircuito questo dovrà lavorare lontano dalla saturazione del suo nucleo magnetico [4].

La normativa fornisce le forme d'onda di riferimento misurate in condizioni di circuito aperto e cortocircuito e queste corrispondono a quelle di Figura 2.2 e Figura 2.3.

Le due misure devono essere effettuate allo stesso voltaggio: nel caso del circuito aperto se utilizziamo un carico di prova questo dovrà essere pari ad almeno $10\text{ k}\Omega$, per il cortocircuito invece consideriamo carico inferiore a $0.1\text{ }\Omega$.

2.2.2 Rete di accoppiamento/disaccoppiamento

L'apparecchiatura di misura utilizzata per la taratura del generatore deve essere utilizzata anche per la rete di accoppiamento/disaccoppiamento confrontando le forme d'onda in circuito aperto e cortocircuito a tensione fissata.

La tensione impulsiva residua misurata tra le linee interessate e la terra sull'alimentazione della rete di disaccoppiamento non deve superare il 15% del valore maggiore tra la massima tensione di prova applicata e il doppio della tensione nominale di picco della rete di accoppiamento/disaccoppiamento. Queste verifiche devono essere fatte con elemento di prova e rete scollegate.

2.3 Esecuzione della prova

Possiamo riassumere la procedura di prova come composta da cinque passaggi:

1. Verifica della strumentazione di prova;
2. Definizione delle condizioni di riferimento del laboratorio;
3. Conferma della corretta funzionalità dell'elemento di prova quando alimentato dalla rete;
4. Esecuzione della prova;
5. Valutazione dei risultati di prova.

Se non specificato diversamente, le condizioni climatiche nel laboratorio devono essere le stesse del normale funzionamento dell'EUT. Le prove non devono essere eseguite se l'umidità relativa è così alta da causare condensazione sull'elemento di prova o su altre parti del sistema elettrico utilizzato. Si deve inoltre cercare di limitare i disturbi elettromagnetici per evitare di influenzare i risultati della prova.

Dopo aver eseguito le verifiche passiamo alla prova, questa deve seguire un piano di prova con definito l'allestimento utilizzato:

- Il livello di prova;
- Il numero di impulsi:
 - Per le porte di alimentazione in c.c. e le linee di collegamento cinque scariche impulsive positive e cinque negative;
 - Per le porte di alimentazione in c.a. cinque scariche impulsive positive e cinque negative a 0°, 90°, 180° e 270°;
- Il tempo di prova tra due impulsi successivi (non oltre i 60 secondi);
- Le condizioni di funzionamento dell'EUT;
- Le porte del dispositivo di prova da testare.

Nel caso particolare in cui l'elemento di prova è un apparecchio LED si applicano una serie di impulsi con forma d'onda 1,2/50 μ s: cinque impulsi di polarità positiva con angolo di fase di 90° e cinque impulsi di polarità negativa con angolo di fase di 270° [2].

Deve essere sottoposto a prova l'intero apparecchio di illuminazione in quanto la conformità dei singoli componenti non garantisce che l'intero apparecchio rispetti tutti i requisiti.

Riferendoci al dispositivo utilizzatore LED, la normativa [7] distingue prescrizioni di immunità a seconda della tipologia di disturbo applicato. Sono possibili:

- Scariche elettrostatiche;
- Disturbi continui e transitori;

- Disturbi irradiati e condotti;
- Disturbi relativi all'alimentazione di rete.

Sono di particolare interesse due prove indicate nella normativa: quelle alle scariche elettrostatiche e quelle relative agli impulsi di tensione.

Per quanto riguarda le scariche elettrostatiche il metodo di prova preferito è la scarica di contatto, vengono applicate 20 scariche (10 di polarità positiva e 10 di polarità negativa) su ciascuna parte metallica accessibile dell'involucro (esclusi i terminali). Con accessibile intendiamo durante il normale funzionamento, non si va a modificare la struttura dell'utilizzatore.

Utilizziamo invece le scariche in aria se non è possibile effettuare quelle di contatto.

Le prove relative agli impulsi di tensione sono indicati in forma tabellare sulle normative facendo riferimento a livelli di prova. Questi possono essere classificati come segue:

- Livello 1

Ambienti ben protetti. Le condizioni di installazione sono tali da avere soppressione di tutti i transitori negli alimentatori e nei circuiti di controllo. Si ha totale separazione rispetto agli ambienti con condizione di esposizione precaria e i cavi di alimentazione sono schermati con schermi messi a terra su entrambe le estremità.

- Livello 2

Ambienti protetti. Sono presenti strumenti di soppressione dei transitori in gran parte degli alimentatori e dei circuiti di controllo, non vi è però una completa separazione dagli ambienti con esposizione precaria. I cavi di segnale e di comunicazione sono separati dai cavi di alimentazione e di controllo.

- Livello 3

Per ambiente industriale tipico. Non sono presenti soppressori di transitori e vi è scarsa separazione rispetto ai circuiti provenienti da ambienti più precari. È scarsa la separazione tra cavi di alimentazione e segnale.

- Livello 4

Per ambiente industriale severo. Rispetto al Livello 3 non vi è alcuna separazione tra i cavi di alimentazione e di segnale, si fa uso di cavi multi conduttori in comune per cavi di segnale e controllo.

- Livello X

Riservato a situazioni speciali.

I livelli più bassi non occorre siano provati.

La procedura di prova deve anche considerare andamenti non lineari di tensione e corrente dell'elemento utilizzatore. Per questo motivo devono essere valutati tutti i livelli di prova inferiori al livello di prova prescelto[4] [7]:

Caratteristiche	Livello di prova		
	Dispositivo		
	Lampade con alimentatore incorporato e semi-apparecchi di illuminazione	Apparecchi e accessori indipendenti	
		Potenza di ingresso	
		≤ 25 W	> 25 W
Dati della forma d'onda	1,2/50 μs	1,2/50 μs	1,2/50 μs
Livelli di prova			
conduttore - conduttore	±0,5 kV	±0,5 kV	±1,0 kV
conduttore-terra	±1,0 kV	±1,0 kV	±2,0 kV
NOTA Oltre al livello di prova specificato, dovrebbero essere soddisfatti anche tutti i livelli di prova inferiori indicati nella IEC 61000-4-5.			

Figura 2.6: Livelli di prova alle porte di ingresso dall'alimentazione in alternata [7]

Livello	Tensione di prova in circuito aperto	
	kV	
	Linea-linea	Linea-terra ^(b)
1	---	0,5
2	0,5	1
3	1	2
4	2	4
X ^a	Speciale	Speciale
(a) "X" può essere qualsiasi livello, al di sopra, al di sotto o tra gli altri livelli. Questo livello deve essere definito nella specifica dedicata dell'apparecchiatura.		
(b) Per le linee di collegamento bilanciate la prova può essere applicata a più linee contemporaneamente rispetto alla terra, cioè "linee a terra".		

Figura 2.7: Valori di tensione a circuito aperto consigliati per la prova dalla CEI 61547

2.4 Requisiti di sicurezza per il laboratorio secondo la CEI 50191

La Norma CEI EN 50191 fornisce indicazioni riguardo le misure di sicurezza che è necessario prendere in un laboratorio elettrico di misura con tensioni e livelli di energia che possono rappresentare un pericolo per le persone.

Per prima cosa occorre valutare i requisiti generali richiesti per un qualsiasi laboratorio di prova.

Il complesso di prova deve essere progettato in modo da garantire la protezione contro i contatti diretti, ovvero deve essere garantita l'impossibilità che una persona presente nel laboratorio entri in contatto con un componente sotto tensione nel normale funzionamento.

Diversa è la protezione contro i contatti indiretti, in tal caso dovremo valutare la tenuta degli isolanti e i dispositivi di sicurezza circuitali e non la struttura stessa del laboratorio.

In ogni caso deve sempre essere garantita la protezione sia contro i contatti diretti (in maniera automatica o meno) sia contro quelli indiretti [9].

La norma di riferimento è la CEI 50191, in questa vengono definite le distanze minime di sicurezza che devono essere presenti tra il personale di prova e la superficie della parte attiva della zona inibita. Nel caso in cui si lavori a tensioni inferiori a 1000 V è possibile considerare la stessa zona attiva come confine della zona inibita, altrimenti occorre prendere alcune precauzioni:

- Installare barriere di sicurezza

Queste devono evitare l'accesso alle aree di prova alle persone che non intervengono nel test di laboratorio, devono ostacolare l'accesso alla zona inibita agli operatori e soprattutto deve far sì che non sia possibile entrare in contatto con le parti attive durante la prova.

Per indicare in maniera precisa le distanze che la barriera fisica deve far rispettare al personale presente in laboratorio, la normativa [9] fornisce dati esplicitati in forma grafica e tabellare utilizzando Figura 2.8 e Figura 2.9:

In un laboratorio di prova le barriere devono essere pareti solide alte almeno 1800 mm, la Direttiva del Consiglio 92/58/CEE prevede inoltre che sia presente un cartello "Vietato l'accesso a persone non autorizzate" in presenza di ogni ingresso.

- Utilizzare indicatori luminosi, segnali luminosi e cartelli

Per prima cosa distinguiamo cosa si intende con indicatori e segnali luminosi: i primi indicano lo stato di manovra sui pannelli di comando, i secondi invece sono luci ben visibili dall'esterno del confine dell'area di prova che emettono segnali rossi o verdi per indicare lo stato di funzionamento all'interno dell'area di prova. Le due soluzioni non sono alternative tra loro.

Per motivi di sicurezza occorre che entrambi i piani di lavoro (quello del generatore e quello in cui è presente l'elemento di prova) siano messi a terra su uno stesso piano. Per questo motivo si è utilizzato un piano in alluminio su parte del pavimento del laboratorio.

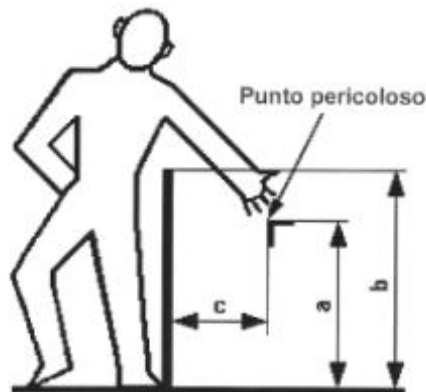


Figura 2.8: Distanze utilizzate dalla CEI 50191

Distanza del punto di pericolo dal pavimento a mm	Altezza del bordo dei mezzi di protezione (barriera) b mm							
	1 000	1 200	1 400	1 600	1 800	2 000	2 200	2 400
	Distanza orizzontale c tra i mezzi di protezione (barriera) e il punto di pericolo mm							
2 400	100	100	100	100	100	100	100	100
2 200	600	600	500	500	400	350	250	
2 000	1 100	900	700	600	500	350		
1 800	1 100	1 000	900	900	600			
1 600	1 300	1 000	900	900	500			
1 400	1 300	1 000	900	800	100			
1 200	1 400	1 000	900	500				
1 000	1 400	1 000	900	300				
800	1 300	900	600					
600	1 200	500						
400	1 200	300						
200	1 100	200						

I valori inferiori a 1 000 mm dal bordo b non sono specificati in quanto ciò non permetterebbe un maggior allungo della mano e in più vi sarebbe il rischio di cadere nell'area di prova.
Le barriere, ad esempio nastri, corde, catene o barre, sono fissati tra 1 000 mm e 1 400 mm di distanza dal pavimento. La distanza minima da terra (sag) non scende sotto gli 800 millimetri.

Figura 2.9: Tabella in cui sono indicate le distanze da rispettare secondo la CEI 50191

Infatti le misure di protezione applicate sulle apparecchiature non sono sufficienti da sole per garantire la sicurezza dell'operatore, di qui la necessità di predisporre misure di protezione complementari.

L'obiettivo principale delle misure di protezione adottate sull'impianto elettrico in laboratorio è garantire l'equipotenzialità. Questa permette di lavorare in sicurezza nei confronti della folgorazione perché se tutte le parti accessibili sono allo stesso potenziale non si può stabilire alcuna corrente attraverso la persona. Per ottenere ciò colleghiamo le masse ad un unico punto elettrico, denominato nodo equipotenziale.

Il collegamento equipotenziale fa sì che un guasto di isolamento, in uno qualsiasi degli apparecchi elettrici, non abbia influenza alcuna nel laboratorio [10].

Per mettere a terra il generatore è sufficiente utilizzare un qualsiasi filo di rame collegandolo alla morsettiera a vite posta sul retro di esso e bloccandolo al piano metallico con

un bullone. Il piano di alluminio come detto è presente anche sotto il banco su cui appoggia l'elemento di prova, così facendo l'operatore si troverà su un piano equipotenziale [12].

Nel caso in cui non sia possibile ottenere un unico piano di materiale metallico è possibile utilizzare più fogli di alluminio collegandoli poi tra loro con cavi in rame.

Vengono distinte due casistiche a seconda che vi sia o meno la protezione automatica contro i contatti diretti, nella seguente trattazione verranno valutate entrambe le possibilità per poi scegliere la soluzione ottimale da utilizzare nel laboratorio utilizzato. Valutiamo le indicazioni che fornisce la normativa a riguardo.

2.4.1 Stazioni di prova con protezione automatica contro i contatti diretti

Un fattore caratteristico di questa modalità di laboratorio è che vi è normalmente soltanto una persona impiegata nell'esecuzione delle prove.

I mezzi di protezione contro i contatti diretti devono garantire almeno il grado di protezione IP3X. Con questa indicazione si intende che non deve essere possibile far entrare in contatto con la zona attiva corpi solidi di dimensione superiore a 2,5 mm. Il grado di protezione IP3X può essere omesso in due casi:

- Se sono presenti pareti solide alte almeno 1800 mm che delimitano l'area di comando da quella in cui si effettua la prova sul componente;
- Se l'involucro del complesso di prova è dotato di dispositivi che non permettono l'apertura delle aree di prova finché non viene azzerata la tensione di prova.

Diventa fondamentale garantire la sicurezza delle persone impedendo che del personale esterno si trovi nell'area di prova mentre il generatore è in funzione. Occorre in particolare fare delle valutazioni sugli ingressi del laboratorio, può infatti verificarsi che del personale esterno utilizzi gli ingressi del laboratorio senza porre attenzione sugli indicatori luminosi e sui cartelli.

Bisognerà quindi prevedere degli elementi che mantengano bloccati gli ingressi durante la prova. Una possibile soluzione è rappresentata dagli elettromagneti di chiusura porta come quello rappresentato in Figura 2.10:

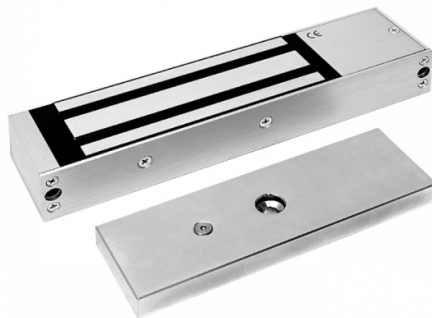


Figura 2.10: Elettromagnete di chiusura porte

2.4.2 Stazioni di prova prive di protezione automatica contro i contatti diretti

Una stazione di prova di questo tipo è quella per cui non si ha completa protezione di tutti gli elementi sotto tensione durante la prova. In generale questa soluzione deve essere adottata solo se non è possibile l'installazione di stazioni con protezione automatica contro i contatti diretti. Questo accade quando si hanno variazioni frequenti della tipologia di prova, quando variano spesso gli elementi da testare o nel caso sia realmente complicato realizzare la protezione automatica [9].

La sicurezza deve essere garantita isolando le parti attive tramite coperture, involucri o ostacoli tali da identificare una distanza di sicurezza minima.

Notiamo come in questa configurazione le barriere e le segnalazioni luminose indicate precedentemente diventano indispensabili per garantire la sicurezza del personale.

Una possibile soluzione è quella di utilizzare cavi di protezione contro i contatti diretti o dispositivi di comando a due mani per applicare le tensioni di prova [9].



Figura 2.11: Comando a due mani

Capitolo 3

Laboratorio di sovratensioni del DENERG del Politecnico di Torino

L'obiettivo che ci poniamo volendo realizzare un laboratorio elettrico è di poter effettuare in sicurezza prove di varia natura focalizzate al raggiungimento di determinati risultati o alla determinazione di condizioni critiche di dispositivi elettrici.

La problematica principale riguarda la necessità di impedire i contatti diretti con l'elemento di prova, sia da parte dell'operatore che da parte di personale esterno che non deve poter entrare nel laboratorio durante i test.

Considerato il gran numero di scenari di guasto e di variabili, testare ogni possibile situazione è praticamente impossibile oltre che economicamente non conveniente.

L'obiettivo delle prove in laboratorio è di verificare che i sistemi e i dispositivi siano in grado di mantenere lo stato operativo previsto al verificarsi degli eventi esterni più comuni.

Includere i generatori nel processo di progettazione di un laboratorio è indispensabile perché sono l'unica sorgente di alimentazione di riserva a lungo termine quando la rete elettrica non è disponibile o quando vogliamo applicare un valore di tensione di gran lunga superiore a quello fornito dalla rete (ad esempio ciò che accade nelle prove di sovratensione).

Il generatore verrà messo a punto e calibrato in modo da assicurare il funzionamento ottimale alle sue condizioni nominali. Il costruttore non sarà probabilmente in grado di fornire la documentazione sul funzionamento previsto del generatore se il carico utilizzato per le prove si scosta dalle condizioni nominali.

La messa a punto e la calibrazione sono particolarmente importanti quando si prova l'applicazione di carico a gradino da 0% a 100% in quanto il sistema rischia di non rispondere correttamente (cioè fuoriesce dalla tolleranza accettata) se il fattore di potenza del carico non corrisponde al valore nominale [8].

In questo capitolo si vogliono esplicitare le misure di sicurezza necessarie per garantire il rispetto dei vincoli normativi, in particolare ponendo l'accento sugli interventi da

compiere. Successivamente verrà fornito un elenco degli strumenti presenti all'interno del laboratorio da utilizzare per effettuare le prove di tenuta all'impulso.

3.1 Laboratorio DENERG



Figura 3.1: Laboratorio presente nel DENERG del Politecnico di Torino

Il laboratorio presente nel DENERG del Politecnico di Torino è caratterizzato dalla presenza di due stanze attigue collegate da una porta antincendio e con la presenza di una finestra tra le due stanze in modo da poter visualizzare cosa accade in una stanza mentre si è nell'altra. Questo è particolarmente utile per le prove di sovratensione in quanto permette di poter affermare che è garantita la protezione contro i contatti diretti in quanto è presente un muro da almeno 180 cm tra l'operatore e l'elemento sotto prova.

I due locali sono rappresentati in Figura 3.2 e Figura 3.3.

Nel locale in cui si trova l'operatore è stato messo in evidenza con il colore rosso il generatore di sovratensioni, questo è posto su un tavolo sulla cui superficie è stata appoggiata una lastra metallica. Una lastra dello stesso materiale viene posta sulla porzione di pavimento al di sotto del tavolo su cui è posto il generatore per garantire l'equipotenzialità all'operatore durante la prova e rispettare così le prescrizioni di sicurezza.

Sarà necessario connettere in generatore al piano equipotenziale presente sul tavolo e successivamente connettere quest'ultimo al piano metallico posto al di sotto del tavolo.

La posizione del generatore è scelta nel punto rappresentato in Figura 3.2 per due motivi:

- il tavolo risulta vicino alle prese e al quadro di alimentazione (rappresentato in verde);



Figura 3.2: Locale in cui si trova l'operatore e il generatore di impulsi



Figura 3.3: Locale in cui viene posto l'elemento di prova

- in prossimità del generatore si ha un buco nel muro (rappresentato in rosa in entrambe le immagini) che consente ai cavi di collegamento di superare il muro di separazione dei due locali, sarà così possibile sostituire facilmente il cablaggio o apportare modifiche ad esso.

La problematica di questo laboratorio è rappresentata dall'elevato numero di ingressi che consentono a personale esterno (pur fornito di chiave) di entrare nelle aree di prova durante la prova.

E' infatti presente una porta di ingresso al locale in cui è posto l'elemento di prova (oltre alla porta di collegamento) e due porte di ingresso (una dal corridoio interno e una dal cortile) per quanto riguarda la stanza in cui è posto il generatore.

3.2 Interventi da effettuare nel laboratorio

Per poter rispettare i requisiti della norma CEI 50191 è necessario intervenire per evitare che le porte dei due locali vengano aperte mentre si sta effettuando una prova. Poichè sono presenti più chiavi non è possibile accettare che vengano solamente chiuse a chiave le porte, soprattutto considerando che il locale in cui è posto l'elemento di prova viene saltuariamente utilizzando anche come deposito.

Una soluzione ampiamente presente sul mercato consiste in elettromagneti di chiusura porte, questi garantiscono la chiusura delle porte del laboratorio durante la prova grazie ad una semplice indicazione proveniente dal generatore. Se il generatore è in stato di riposo l'elettromagnete non è percorso da corrente e le porte si possono aprire, se invece azioniamo il generatore di impulsi l'elettromagnete blocca le porte impedendone l'apertura.

Ovviamente sono possibili varie soluzioni sul mercato legate anche alla quanto questi dispositivi possono supportare sforzi applicati su di essi. Rappresentano una soluzione economica e di semplice installazione.

Sul mercato sono disponibili più elettromagneti di chiusura porte con costi compresi tra i 50 e i 200 euro, occorre considerare che sarà necessario acquistarne quattro in quanto deve essere impossibile ad operatori esterni di entrare nel laboratorio ma anche agli stessi operatori deve essere negato l'ingresso nel locale in cui la sovratensione viene applicata all'EUT.

Nelle Figure 3.4, 3.5 e 3.6 vengono indicati tre possibili elettromagneti presenti sul mercato, trattandosi di una soluzione molto semplice utilizzata anche al di fuori dei laboratori sono presenti moltissime alternative sul mercato con accessori differenti. Ad esempio l'elettromagnete Windowo 12800M presenta una segnalazione luminosa che può essere utile se associata ad un cartello che ne espliciti lo stato al di fuori delle porte.



Figura 3.4: Dorma modello Tv200



Figura 3.5: Windowo modello 12800M



Figura 3.6: Serai modello EM02

Il montaggio di questi componenti è molto semplice, nella versione base sono composti da due parti: nucleo elettromagnetico e controplacca a cui va aggiunto un pulsante di sblocco di colore variabile (in generale rosso o nero). L'elettromagnete deve essere montato sul muro, mentre la controplacca sulla porta.

Utilizzando uno degli ingressi cavo presenti sul corpo plastico occorre cablare il circuito

presente all'interno e attivare così il fenomeno di chiusura.

Alimentando l'elettromagnete con una leggera pressione facciamo combaciare il nucleo con la contropiacca, si verificherà così attrazione tra le due parti che verrà meno solamente utilizzando il pulsante di sblocco [11]. Questo pulsante generalmente viene posto sulla parete vicina all'elettromagnete, per i nostri scopi è utile invece utilizzare un cavo più lungo e porlo sulla parete vicina al generatore di impulsi. Potremo così utilizzare una segnaletica che preveda di bloccare le porte prima di effettuare la prova in modo da poter rispettare i requisiti di prova.

Per un funzionamento ottimale l'elettromagnete va mantenuto pulito, i produttori consigliano di pulirlo con un panno asciutto ogni volta che si effettua pulizia del locale.

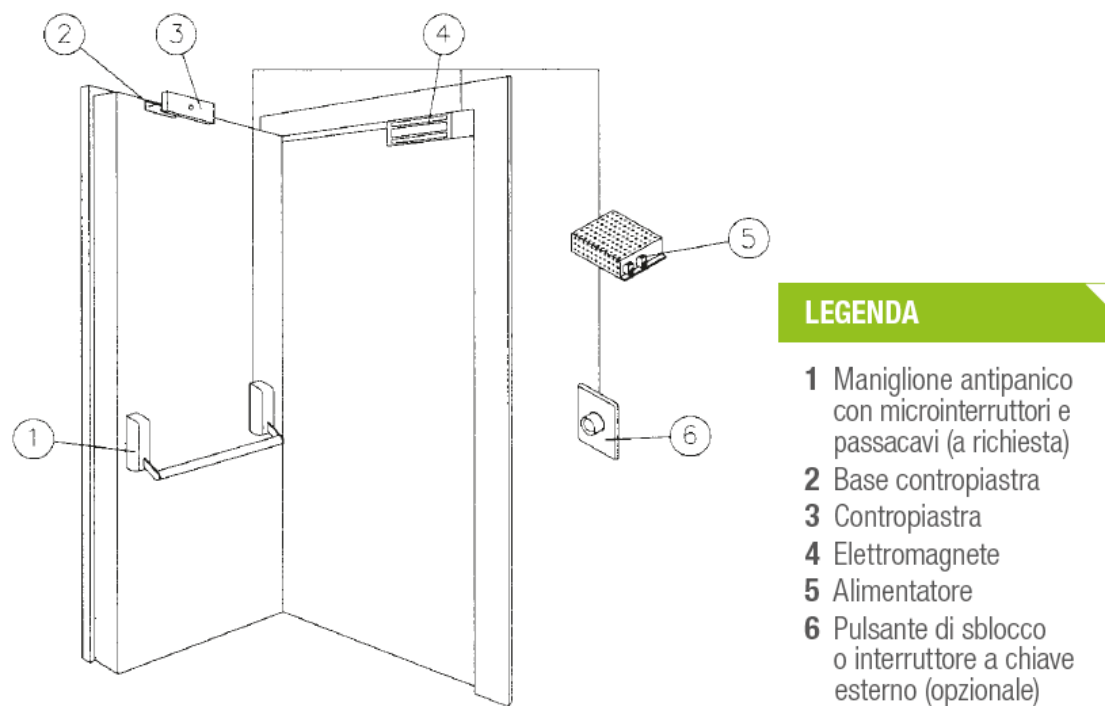


Figura 3.7: Esempio di disposizione dei componenti fornito sul catalogo degli elettromagneti Opera

3.2.1 Soluzioni per stazioni di prova prive di protezione automatica contro i contatti diretti

Abbiamo visto come la parete divisoria permetta di accettare che venga garantita la protezione automatica contro i contatti diretti, viene in seguito esplicitata una possibile soluzione nel caso in cui ciò non sia possibile.

In questo caso una possibile soluzione è rappresentata dai dispositivi di comando a due mani. Questi sono comandi ad azione mantenuta che richiedono l'azionamento contemporaneo di due attuatori manuali (che possono essere ad esempio pulsanti), per avviare e mantenere il funzionamento della macchina o degli elementi pericolosi di quest'ultima, assicurando così protezione alla persona che li aziona.



Figura 3.8: Comando a due mani

L'utilizzo di questo strumento fa sì che al rilascio anche solo di un attuatore (pulsante, maniglia, leva, ecc.) il movimento dell'organo pericoloso si interrompa. Gli attuatori devono essere conformati e posizionati in modo da consentirne l'azionamento esclusivamente con l'impegno di ambedue le mani.

Il comando a due mani deve essere collocato ad una distanza di sicurezza dalla zona pericolosa, tale da rendere impossibile il raggiungimento dell'organo pericoloso in movimento. Quando questo apparecchio non è fissato alla macchina (può ad esempio essere collocato su una postazione di comando mobile) questa deve essere fissata a pavimento o ad altra struttura fissa ad una distanza di sicurezza dalla zona pericolosa.

Questi dispositivi devono essere mantenuti efficienti e perfettamente funzionanti tramite manutenzione. La verifica del corretto funzionamento deve essere effettuata all'inizio di ogni turno di lavoro e sempre dopo interventi di manutenzione o regolazione della macchina o del dispositivo stesso prima di riprendere il normale ciclo di produzione [13].

La verifica può consistere in semplici manovre:

- Azionare un solo attuatore del dispositivo di comando a due mani e verificare che l'organo pericoloso non si avvii;
- Ripetere la medesima azione sull'altro attuatore
- Durante l'azionamento contemporaneo dei due attuatori rilasciarne solo uno, l'organo pericoloso dovrà arrestarsi immediatamente;
- Ripetere la medesima azione rilasciando solo l'altro attuatore

- Verificare l'impossibilità di azionare i due attuatori del dispositivo senza l'impegno contemporaneo delle due mani (con una sola mano, con una mano ed una altra parte del corpo, con una mano tramite un attrezzo o oggetto disponibile nella postazione di lavoro, ecc.).

I dispositivi di comando a due mani non sono comunque da considerarsi misura sufficiente se alla macchina é addetto più di un lavoratore. In tal caso deve essere verificata la possibilità di rendere sicura l'attivazione dell'organo pericoloso tramite tanti dispositivi di comando a due mani quanti sono i lavoratori addetti al funzionamento della macchina ovvero tramite altro sistema di protezione [13].

Rispetto alla condizione in cui si aveva protezione automatica contro i contatti diretti, in questo caso tutti gli impianti di prova possono essere messi in funzione solo se è presente una persona esperta in grado anche di curarne la manutenzione.

Il personale esperto dovrà per prima cosa indicare i rischi alle persone eventualmente presenti, inoltre sarà lui stesso ad effettuare le operazioni di prova se le tensioni di lavoro superano i 1000 V. Inoltre è consigliato dalla norma che durante la prova sia presente una seconda persona in grado di riconoscere immediatamente condizioni di pericolo e di eliminarlo azionando il dispositivo di spegnimento di emergenza.

Se i circuiti di prova sono connessi elettricamente al sistema di alimentazione generale occorre inserire una protezione aggiuntiva come un RCD (interruttore differenziale) con corrente nominale differenziale inferiore a 30 mA [9].

Eventualmente possiamo considerare un circuito di disaccoppiamento appropriato tale da disalimentare il circuito prima che il guasto si propaghi verso la rete.

3.3 Strumenti di misura

3.3.1 Generatore di impulsi

Il generatore presente in laboratorio è il VCS500N10 certificato per poter essere utilizzato nelle prove di tenuta alle sovratensioni della norma CEI 61000 4-5.



Figura 3.9: Generatore utilizzato in Laboratorio

Questo è in grado di immettere nel circuito di prova tensioni comprese tra i 500 V e i 10 kV. Lo schema circuitale semplificato del generatore è riportato in Figura 3.10:

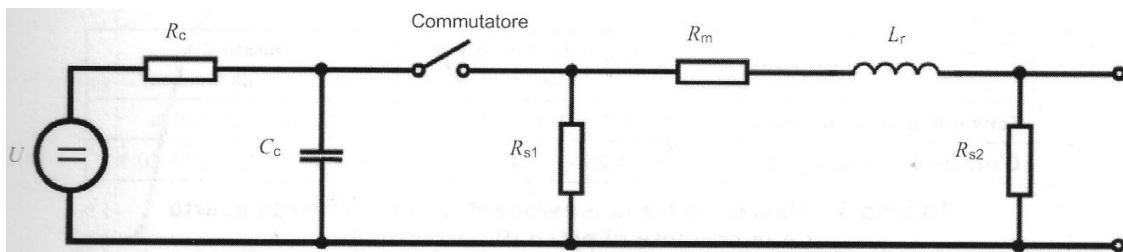


Figura 3.10: Circuito equivalente del generatore

Questo generatore lavora con un semplice menù di controllo del sistema. È possibile scegliere tra sette funzioni chiave (da F1 a F7) per selezionare i parametri e i comportamenti voluti. Le funzioni vengono poi indicate sul display utilizzando un massimo di 8 linee e 40 caratteri.

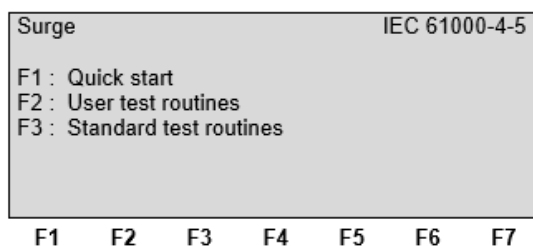
I parametri vengono modificati utilizzando i comandi a lato:

- Con le frecce possiamo visualizzare i parametri indicati sul video e cambiarli (nella parte inferiore dello schermo avremo memoria della selezione fatta);
- Con il tasto ESC torniamo al livello precedente, le scelte fatte vengono salvate automaticamente;
- Con EXIT infine si torna alla schermata principale.

Il modello del generatore e l'indicazione SWN vengono indicati per poter tracciare il prodotto, sono utilizzati per i certificati di garanzia del prodotto ed eventualmente per le relazioni (se necessario) [5].

I test di sovratensione vengono effettuati tramite procedure specifiche:

1. F1 Quick Start



In questa fase si verificano velocemente le funzionalità standard dell'apparecchio. Premendo START la routine viene eseguita, se vogliamo modificare i parametri invece utilizziamo CHANGE:

QUICK START						
Voltage	V	:	250V	-	8000V	
angle	A	:	0 dgr	-	360 dgr	
Events	n	:	1	-	30000 endl.	
Repetition	Rep	:	3s	-	999s	
V	A	+/-	cpl	Rep	n	tri
160	0	+	L+N+PE	1	00001	Auto
F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7

L'utente seleziona il parametro da modificare e successivamente muovendo la manopola valuta le possibili alternative. Come si vede dall'immagine è possibile variare diversi parametri.

Una volta definito come procedere con la prova si preme ESC e i dati vengono automaticamente salvati, possiamo così applicare il Restart. Per interrompere la procedura possiamo selezionare una qualsiasi funzione tranne F2 (Manual Trigger).

2. Standard Test Routine

Standard test routines			
F1 : IEC 61000-4-5	Level 1	500V	
F2 : IEC 61000-4-5	Level 2	1000V	
F3 : IEC 61000-4-5	Level 3	2000V	
F4 : IEC 61000-4-5	Level 4	4000V	
F5 : Level X	–	Level Y	

F1 F2 F3 F4 F5 F6 F7

La Normativa [CEI EN 61000 4-5] fornisce le tensioni di prova in circuito aperto da applicare in relazione al livello di prova. Sul generatore possiamo selezionare direttamente il livello di prova scegliendo tra F1 e F5. In questa fase gli unici parametri che l'utente può modificare sono l'intervallo di ripetizione (rep) e il numero di impulsi per il test (n). In generale utilizzando una frequenza di ripetizione più alta la durata del test può essere ridotta in maniera significativa.

Per la procedura di test possiamo seguire lo schema rappresentato in Figura 3.11:

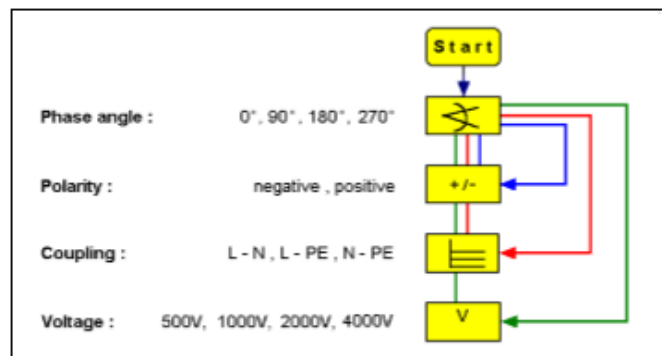


Figura 3.11: Schema a blocchi generatore

Occorre applicare gli impulsi facendo riferimento alle quattro possibili fasi indicate nella norma CEI EN 61000 4-5, sia con polarità positiva che negativa.

3. User Test Routine

Utilizzando F2 l'utente può personalizzare una propria routine di test, in particolare possiamo variare la tensione di test utilizzata, la fase della corrente ed eventualmente impostare una variazione sull'applicazione degli impulsi (L-N, L-E, ecc.) dopo un certo numero di test.

Verifica dell'impulso

Le forme d'onda in uscita al generatore sono specificate come tensioni a circuito aperto e correnti di cortocircuito, vengono quindi misurate senza essere collegate all'elemento di prova.

Per effettuare queste verifiche sono necessari alcuni strumenti:

- Un oscilloscopio con banda in frequenza di almeno 20 MHz;
- Una resistenza di almeno 10 k Ω per rappresentare il circuito aperto.

In entrambi i casi le tensioni di prova devono essere verificate con accoppiamento L-N, lo schema di prova deve essere realizzato come in Figura 3.12:

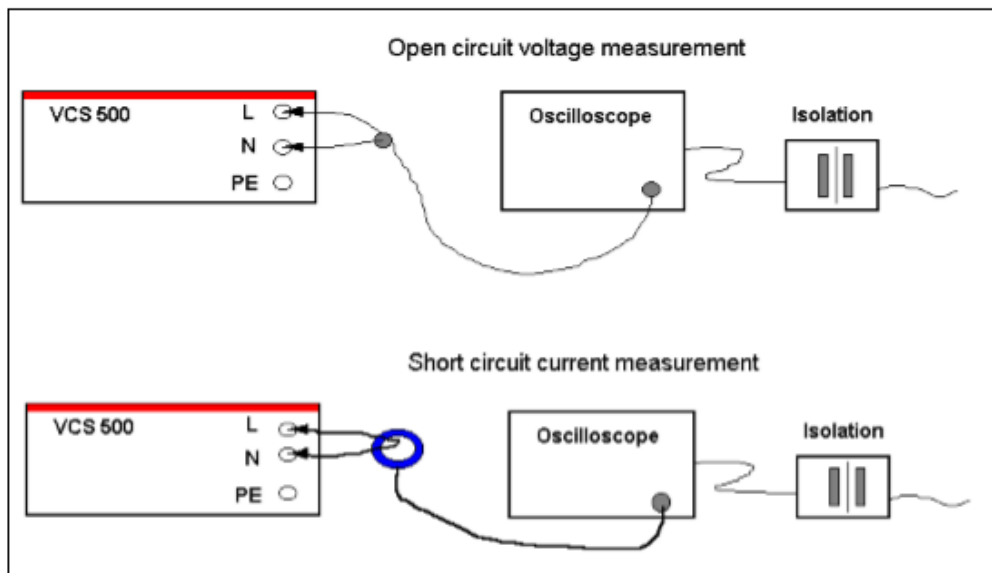


Figura 3.12: Schematizzazione per la verifica degli impulsi

3.3.2 Altri strumenti già presenti nel laboratorio

Il laboratorio è già fornito di altri elementi ausiliari necessari per la realizzazione delle prove:

- un oscilloscopio LeCroy;
- Cavo ottico per comando da remoto, fornito assieme al generatore di impulsi;
- trasformatore di isolamento 230/230 V;
- fogli di alluminio per poter lavorare su un piano equipotenziale;
- cavi di sezione 35 mm² e inferiori per vari livelli di test;
- PC per comando da remoto del generatore, per elaborazione dei dati;
- CD di installazione software ISMIEC per comando da remoto.

Per quanto riguarda l'oscilloscopio LeCroy, questo è provvisto di uscita USB per il salvataggio dei dati su periferica esterna, di modo da facilitare l'elaborazione dei dati. Esso presenta una frequenza di campionamento di 200MHz, sufficiente a campionare almeno 30 campioni e fornire così una forma d'onda accurata.

3.3.3 Rete di accoppiamento e disaccoppiamento

Attualmente il laboratorio non presenta una rete di accoppiamento/disaccoppiamento.

Finora sono state effettuate prove di tenuta all'impulso su dispositivi non alimentati, questo consente di verificare la tenuta dell'elemento di prova ad una scarica anche di 10 kV ma la separazione tra il circuito di prova e la rete di alimentazione è totale in quanto non vi è collegamento.

Questa operazione fa sì che i requisiti richiesti dalla norma CEI 61000 4-5 non siano rispettati, ma è utile per valutare la robustezza del componente.

In particolare sono state svolte prove su un dispositivo LED, l'idea era di sfruttare il comportamento dello strato conduttivo in alluminio della lampada come faccia di un condensatore a facce piane e parallele. Per verificare il funzionamento di questa struttura i terminali di uscita del generatore sono stati collegati direttamente ai morsetti di alimentazione della lampada.

Capitolo 4

Progettazione della rete di accoppiamento/disaccoppiamento

Sono possibili varie soluzioni sul mercato per quanto riguarda le reti di accoppiamento/disaccoppiamento. In generale i costruttori per ciascun generatore di impulsi forniscono sul catalogo una soluzione di questo tipo consigliandole per misurazioni e prove che richiedono alta precisione delle forme d'onda in uscita.

Queste reti CDN (*Coupling Decoupling Network*) sono però componenti che presentano un costo elevato. Infatti acquistare un generatore di impulsi con la corrispettiva rete di accoppiamento/disaccoppiamento porta a ottenere un costo quasi doppio rispetto all'acquisto del solo generatore.

Gli stessi costruttori consigliano, per scopo didattico e di verifica di circuiti elettronici per la ricerca, di costruire da sé una rete di questo tipo sfruttando le indicazioni fornite dalla norma CEI 61000 4-5.

Queste indicazioni non sono però totalmente univoche, sono infatti indicati con precisione i moduli dei reattori utilizzati per la rete di accoppiamento ma lo stesso non si può dire per la rete di disaccoppiamento. In quest'ultimo caso infatti è necessario effettuare simulazioni preventive per verificare che siano rispettati i requisiti in termini di caduta di tensione e corrente.

In questo capitolo una volta determinati i valori dei reattori tramite indicazioni normative e studi condotti in precedenza, vengono effettuate delle simulazioni per definire quali sono le prestazioni (in termini di tensione ai suoi capi e corrente) richieste da questa struttura per poter così effettuare un'analisi di mercato dei componenti stessi.

La norma CEI 61000 4-5 indica per alimentazione monofase due possibili soluzioni a seconda che il generatore venga collegato linea-linea o linea terra. Le due possibili soluzioni sono quelle rappresentate in Figura 4.1 e Figura 4.2.

La rete di disaccoppiamento non varia a seconda del tipo di connessione utilizzata, la rete di accoppiamento invece utilizzerà connessioni differenti nei due casi e anche le forme d'onda ottenute sul componente presenteranno lievi variazioni.

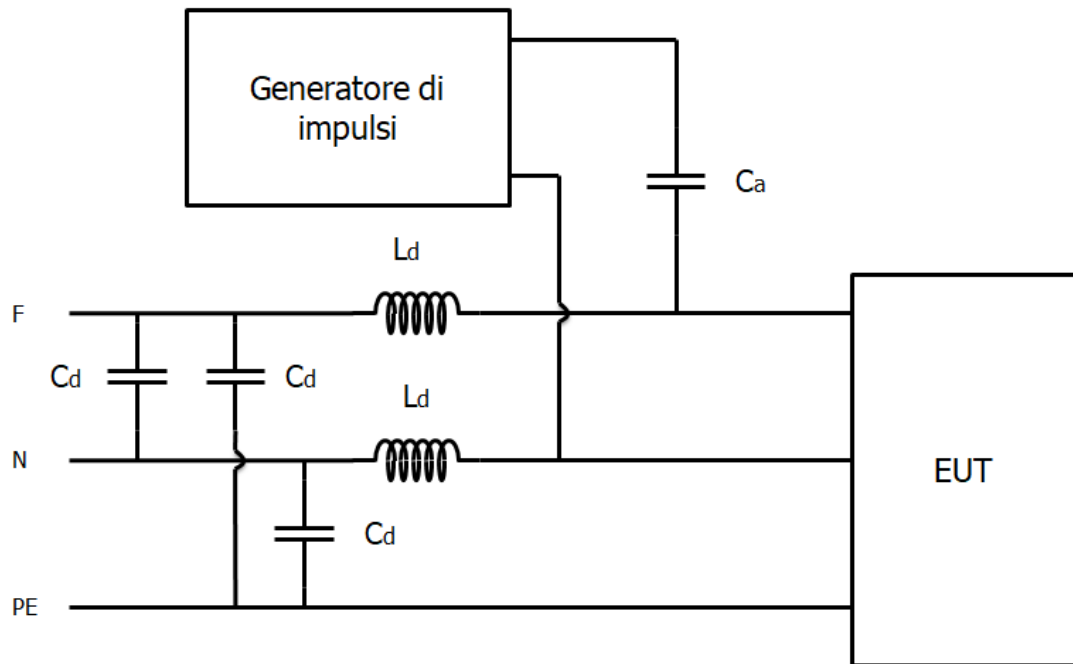


Figura 4.1: Rete CDN caso collegamento linea linea

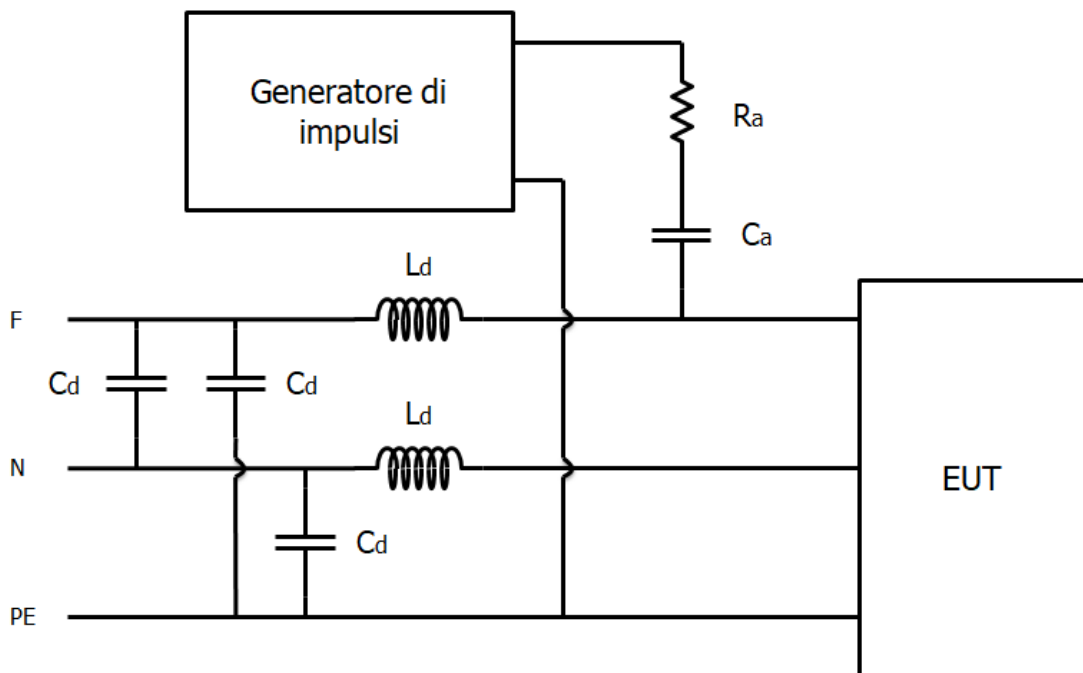


Figura 4.2: Rete CDN caso collegamento linea terra

4.1 Componenti da progettare

4.1.1 Rete di accoppiamento

La rete di accoppiamento è quella per cui c'è meno arbitrarietà nella scelta dei componenti. Considerando sia l'efficienza richiesta alla corrente generata che i problemi relativi alla tensione di picco residua presente, la Norma CEI 61000 4-5 propone l'utilizzo, per un accoppiamento linea-linea, di una capacità da $18 \mu F$, mentre per l'accoppiamento linea-terra si utilizza una capacità da $9 \mu F$ e una resistenza da 10Ω in serie.

Nel caso in cui il generatore presenti già una resistenza in uscita ai suoi morsetti occorre considerare che questa sarà in serie a quella della rete di accoppiamento da 10Ω . Avremo quindi un'impedenza di uscita maggiore che può essere la causa della variazione delle forme d'onda in uscita.

Per eseguire l'accoppiamento linea-linea, il generatore dovrebbe avere un'uscita senza messa a terra: in tal il terminale basso va collegato direttamente a una delle linee di alimentazione o al conduttore di messa a terra dell'apparecchiatura. Il terminale alto del generatore viene invece collegato all'altra linea di alimentazione tramite la rete di accoppiamento [14].

Se viene scelta una capacità di valore troppo basso rispetto a quella indicata possono verificarsi picchi di tensione ridotti sulle linee che non devono subire la scarica, ma così facendo si riduce anche l'efficienza della scarica di corrente (e vice versa).

4.1.2 Rete di disaccoppiamento

In generale una rete di disaccoppiamento è un filtro passa-basso di tipo LC.

La CEI 61000 4-5 fornisce dei requisiti per la rete di disaccoppiamento in termini di prestazioni richieste. La sovratensione residua sulle linee non sottoposte a sovratensione non deve superare il 15% della massima tensione applicabile sull'elemento di prova quando questo è scollegato e siamo in circuito aperto.

Gli induttori della rete di disaccoppiamento sono in serie e sono percorsi dalla stessa corrente che va all'elemento di prova, durante il normale funzionamento presentano una differenza di potenziale tra di loro. La caduta di tensione sulla porta della CDN associata all'elemento di prova dovrà essere inferiore al 10% lavorando alla corrente nominale indicata.

La normativa fissa il massimo valore di ciascun induttore a 1.5 mH, ma non sono forniti esempi per la capacità. Questa può essere ottenuta tramite simulazioni matematiche oppure confrontando altre fonti in cui essa viene esplicitata (ad esempio analizzando il circuito di disaccoppiamento utilizzato in altre pubblicazioni possiamo avere una stima dell'ordine di grandezza della capacità richiesto).

Se la rete di disaccoppiamento è tarata per 25 A, 220 V e 50 Hz, è possibile tollerare una caduta di 22 V (in valore efficace) sulla rete di disaccoppiamento. Pertanto l'induttanza massima non dovrà superare i 3 mH. Questo limite si riferisce alla somma delle due induttanze e quindi ciascuna induttanza non potrà superare il valore di 1,5 mH.

Per valori di corrente più elevati occorre ridurre l'induttanza di disaccoppiamento. Un altro parametro da tener conto per la scelta dell'induttanza è la dimensione richiesta.

Infatti le induttanze più elevate presentano maggiori dimensioni fisiche con conseguenti problemi di installazione. È quindi preferibile avere valori di induttanza tali da permettere dimensioni ridotte.

La scelta dell'induttanza e della capacità di disaccoppiamento è associata alla caratteristica in frequenza del segnale di sovratensione.

All'aumentare dell'induttanza o della capacità di disaccoppiamento la tensione di picco residua risulta ridotta sugli ingressi della linea di alimentazione. Lo stesso fenomeno può essere ottenuto nella casistica linea-terra.

Per quanto riguarda la scelta di questi parametri si è fatto riferimento ad una prova di laboratorio molto simile a quella che si vuole progettare in questo elaborato. Le informazioni riguardanti questa prova si possono trovare nell'articolo "*Coupling and Decoupling Network for Surge Immunity Test on Power Lines*" scritto dai ricercatori della School of Electrical Engineering della città di Wuhan in China. Alla realizzazione di questo elaborato hanno preso parte Mi Zhou, Jianguo Wang, Yang Liu e Fang Liu.

I test di laboratorio sono stati effettuati con la configurazione rappresentata in Figura 4.3:

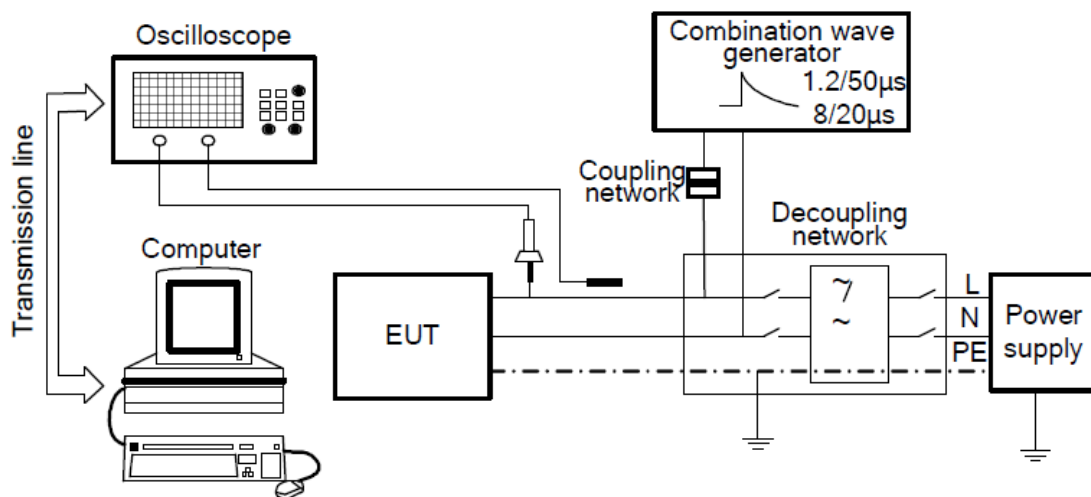


Figura 4.3: Impianto di prova utilizzato dal team della Wuhan University

Anche in questo caso gli impulsi di prova sono stati effettuati fino a 10 kV con elemento di prova alimentato dalla rete durante la prova.

Possiamo allora utilizzare i valori di capacità e induttanza ricavati in questo articolo e effettuare simulazioni per verificare se questo valore è accettabile anche nel nostro caso. I reattori utilizzati sono:

- Per quanto riguarda gli induttori sono scelti due induttori da 1.5 mH (come già consigliato dalla normativa);
- Per i condensatori invece vengono selezionate tre capacità da 30 μF uguali.

4.1.3 Resistenze e reattori necessari

Possiamo allora riepilogare i componenti che dovranno essere progettati o acquistati per la realizzazione di una rete di accoppiamento/disaccoppiamento che rispetti le indicazioni fornite dalla normativa.

Tabella 4.1: Parametri rete di accoppiamento

Componenti rete di accoppiamento			
Connessione	Capacità C_a [μF]	Resistenza R_a [Ω]	Induttanza L_a [mH]
Linea - Linea	18	-	-
Linea - Terra	9	10	-

Tabella 4.2: Parametri rete di disaccoppiamento

Componenti rete di disaccoppiamento			
Connessione	Capacità C_d [μF]	Resistenza R_d [Ω]	Induttanza L_d [mH]
Linea - Linea	30	-	1.5
Linea - Terra	30	-	1.5

4.2 Simulazione della rete CDN

4.2.1 Effetti del carico sull'impulso di tensione

Per prima cosa vogliamo verificare se la forma d'onda dell'impulso viene influenzata dalla tipologia di carico. Consideriamo in particolare due possibili carichi sia per l'accoppiamento linea-linea che per quello linea-terra:

- carico puramente resistivo con un'unica resistenza da $13\ \Omega$ (Figura 4.4);
- carico composto da una resistenza da $10\ \Omega$ in serie ad un condensatore da $382\ \mu F$ (Figura 4.4).

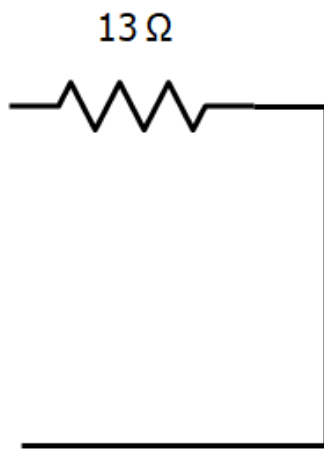


Figura 4.4: Carico puramente resistivo

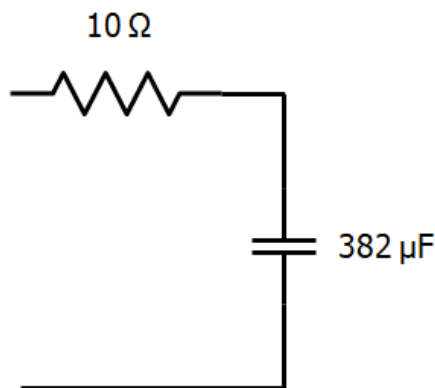


Figura 4.5: Carico con resistenza e capacità

In entrambe le soluzioni otteniamo un'impedenza equivalente di carico che assorbe una corrente da 25 A. In tal modo avremo che l'unico fattore che va ad influenzare le forme d'onda è proprio la composizione del carico.

La tensione misurata ai morsetti di alimentazione dell'elemento di prova sarà la stessa misurata a valle dell'induttore di disaccoppiamento (cioè lato EUT) come indicato in Figura 4.6 per l'accoppiamento linea-linea e in Figura 4.7 per l'accoppiamento linea-terra.

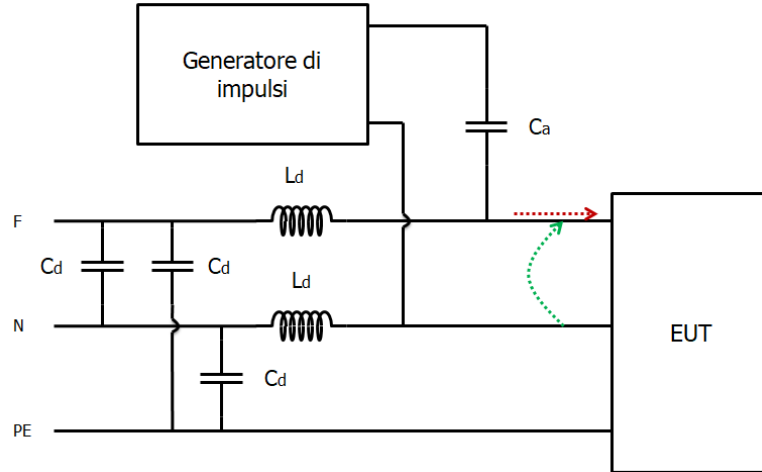


Figura 4.6: Punti in cui vengono misurati tensione (verde) e corrente (rosso)

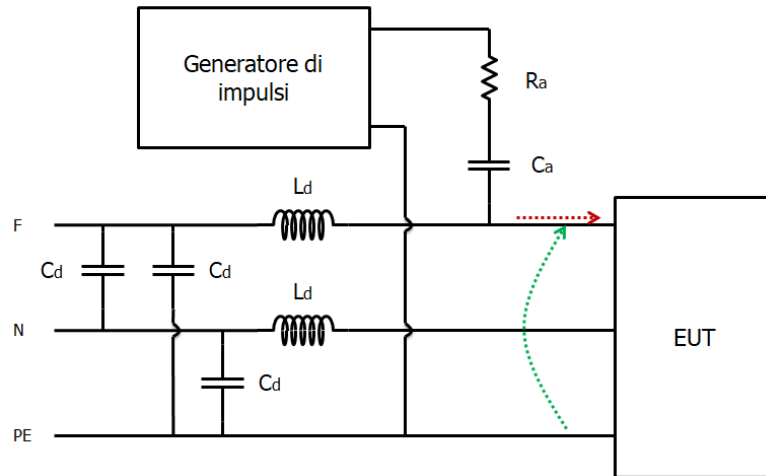


Figura 4.7: Punti in cui vengono misurati tensione (verde) e corrente (rosso)

Caso accoppiamento linea-linea

Effettuiamo prima una simulazione su LTspice e con le forme d'onda ottenute effettuiamo un confronto utilizzando Matlab. Ciò che si ottiene è il grafico in Figura 4.8:

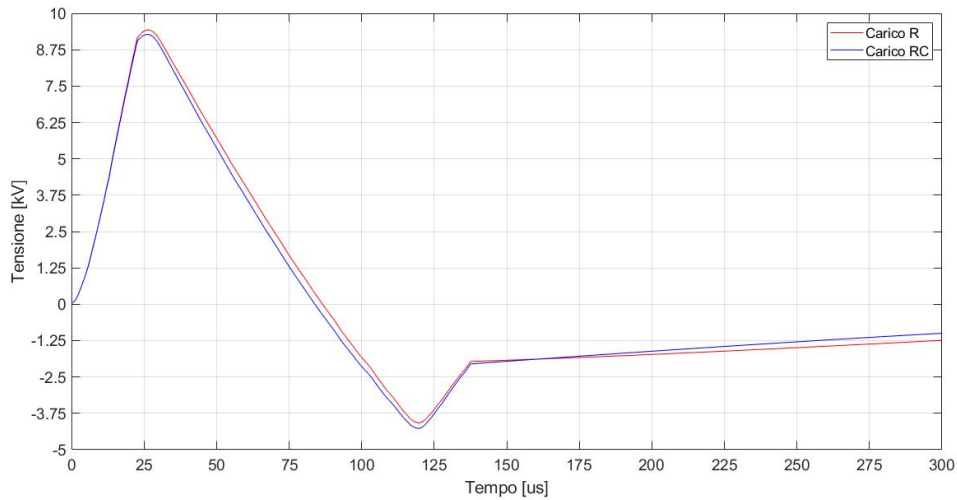


Figura 4.8: Confronto tra le forme d'onda in ingresso all'EUT

Sostanzialmente possiamo dire che la presenza di un componente capacitivo riduce l'impulso prodotto dal generatore, questa variazione è però trascurabile in quanto l'efficacia del test può essere assunta come invariata visto che riguarda solamente 200 V su un test da 10 kV (in prossimità dei picchi positivo e negativo).

Caso accoppiamento linea-terra

Dalla Figura 4.9 notiamo che valgono le stesse considerazioni fatte per il caso linea-linea: la variazione di tensione con tipologia differente di carico è trascurabile se consideriamo gli impulsi raggiunti durante la prova. Per il collegamento linea-terra la differenza tra i due impulsi risulta ancora più trascurabile che nel caso linea-linea.

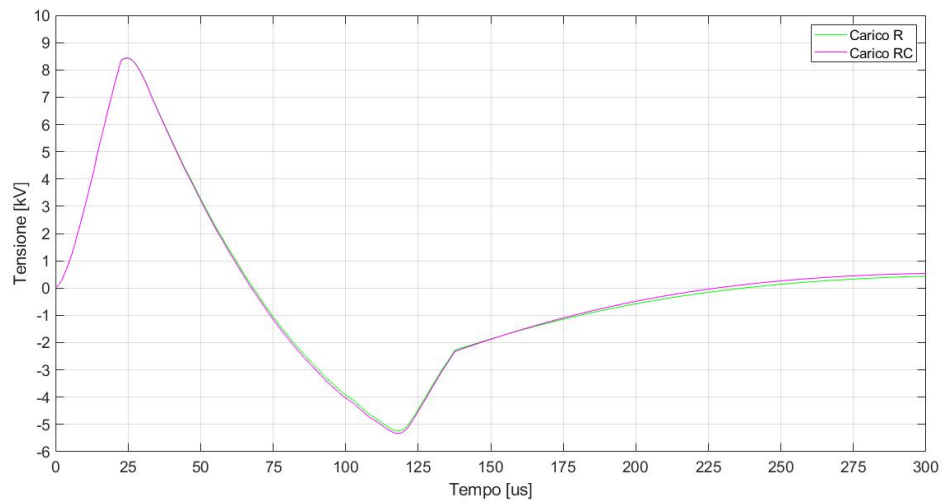


Figura 4.9: Confronto tra le forme d'onda in ingresso all'EUT

4.2.2 Effetti del carico sull'impulso di corrente

Consideriamo le due tipologie di carico schematizzate precedentemente, anche in questo caso vengono effettuate delle simulazioni su LTspice e successivamente i dati vengono confrontati utilizzando Matlab.

Caso accoppiamento linea-linea

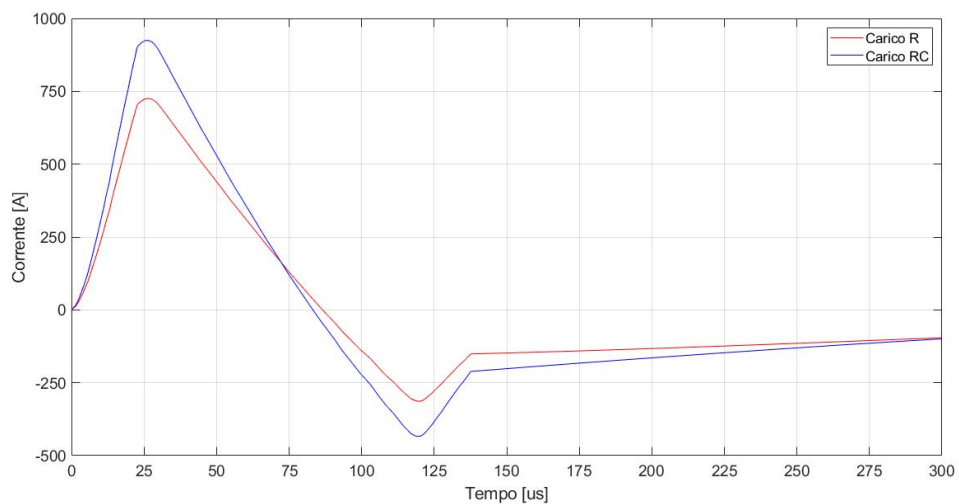


Figura 4.10: Confronto tra le forme d'onda in ingresso all'EUT

Come possiamo notare in Figura 4.10 la presenza di un componente capacitivo fa sì che la sovracorrente ai capi del carico aumenti.

Caso accoppiamento linea-terra

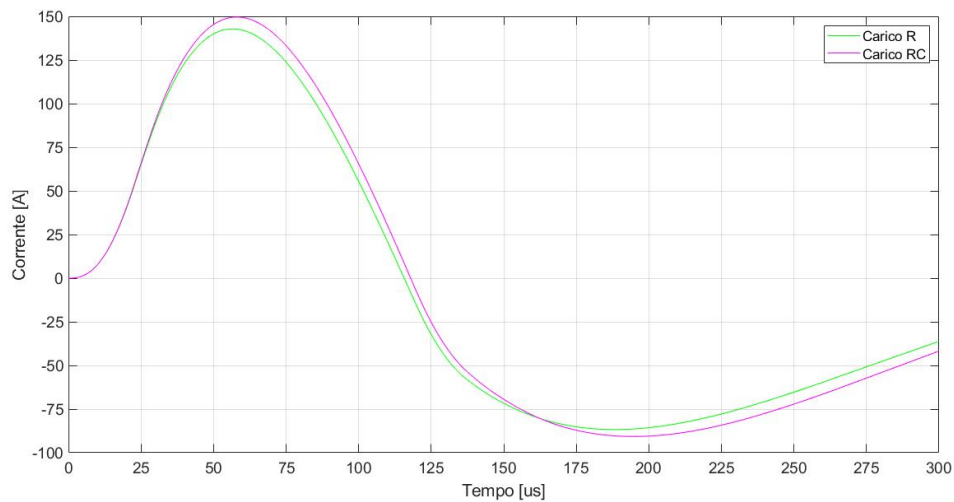


Figura 4.11: Confronto tra le forme d'onda in ingresso all'EUT

Nel caso in cui si utilizzi accoppiamento linea-terra la differenza tra le sovracorrenti nei due casi è ridotta, rimane comunque un valore di picco superiore per il caso con carico RC come rilevato in Figura 4.11.

Considereremo d'ora in avanti un carico resistivo-capacitivo perché abbiamo visto che questo provoca una leggera riduzione dell'impulso di tensione e un aumento del picco di corrente significativo. Valuteremo solamente questa casistica per poterci concentrare sugli altri parametri di interesse.

4.2.3 Effetti dell'induttore di disaccoppiamento sull'impulso di corrente verso rete

Un elemento particolarmente importante per quanto riguarda la realizzazione di un'adeguata rete di accoppiamento/disaccoppiamento è l'induttore di disaccoppiamento. Nella normativa [4] viene indicato come valor massimo di induttanza per ciascun induttore 1.5 mH.

Mentre la tensione di ritorno alla rete viene perfettamente filtrata dal filtro LC di disaccoppiamento, la corrente che torna al generatore presenta valori superiori a quelli del normale funzionamento.

La relazione che lega induttanza e corrente di ritorno è stata valutata simulando due reti di disaccoppiamento differenti in cui veniva lasciata la stessa terna di condensatori da 30 μF e veniva variato il modulo dei due induttori da 1.5 mH a 1.3 mH.

Per poter considerare il valore istantaneo della corrente che arriva alla rete è stata inserita nel circuito una resistenza parassita del valore di 1 $m\Omega$ in serie al generatore che rappresenta la rete. Questa rappresenta un fattore di dispersione generico del collegamento e quindi non danneggia la simulazione ma anzi la avvicina al caso reale.

Se consideriamo gli schemi circuitali possiamo visualizzare i punti di misura attraverso la Figura 4.12 per l'accoppiamento linea-linea e la Figura 4.13 per l'accoppiamento linea-terra.

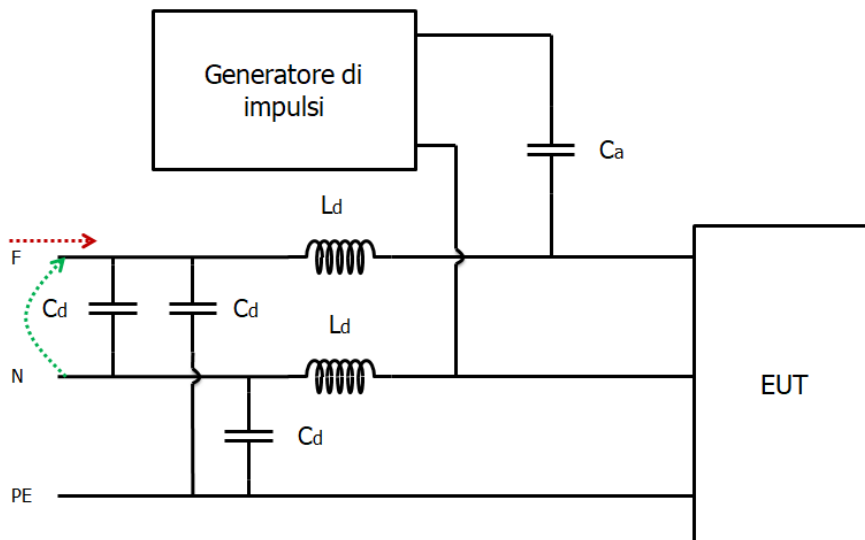


Figura 4.12: Punti in cui vengono misurati tensione (verde) e corrente (rosso)

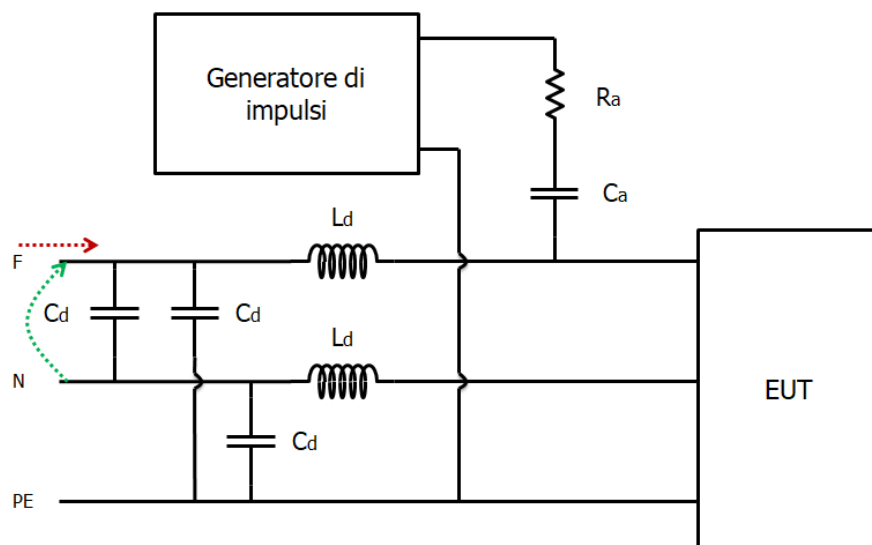


Figura 4.13: Punti in cui vengono misurati tensione (verde) e corrente (rosso)

Per queste simulazioni è stato considerato un impulso applicato con un ritardo di 20 ms. Questo permette di poter valutare la forma d'onda di corrente sia prima che dopo la sovracorrente.

Caso accoppiamento linea-linea

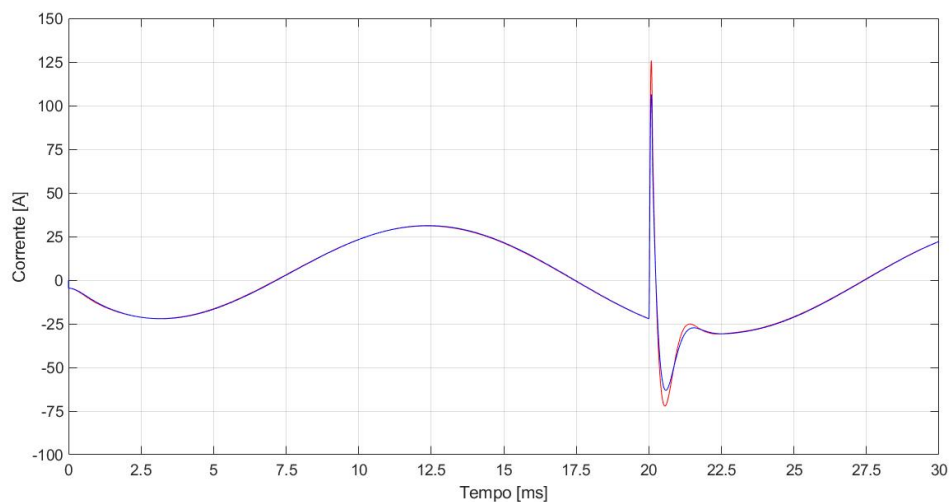


Figura 4.14: Confronto tra le forme d'onda in ingresso alla rete di disaccoppiamento

Notiamo come il valore istantaneo di corrente superi abbondantemente il valore massimo di poco inferiore ai 32 A ottenuto a regime.

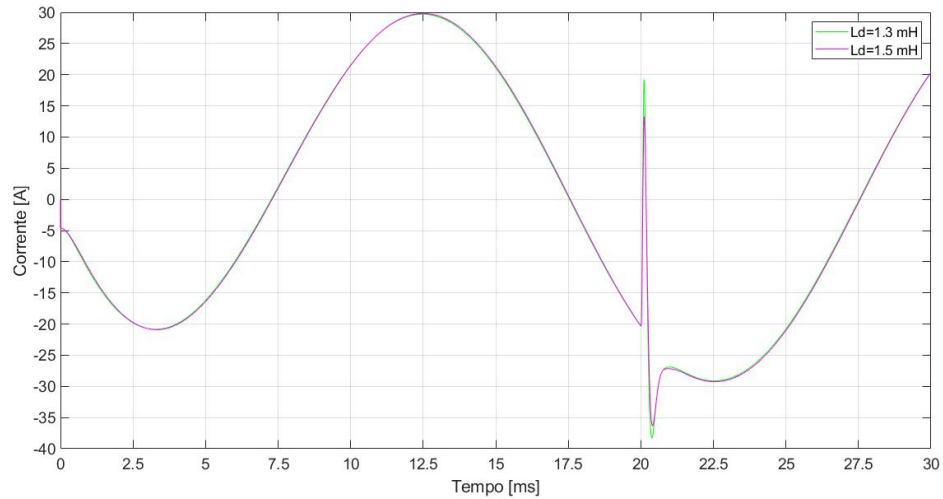
Caso accoppiamento linea-terra

Figura 4.15: Confronto tra le forme d'onda in ingresso alla rete di disaccoppiamento

Come per il caso con accoppiamento linea-linea, anche per il linea-terra nasce una sovracorrente rispetto al massimo valore ottenuto a regime di 30 A.

Poiché in entrambi i casi abbiamo che il picco della sovracorrente cresce al diminuire dell'induttanza di disaccoppiamento, occorre mantenere le due L_d al massimo valore consentito dalla normativa, cioè 1,5 mH per ciascun induttore.

4.2.4 Effetti dell'induttore di disaccoppiamento sulla forma d'onda di tensione verso rete

Abbiamo visto come al variare dell'induttanza di disaccoppiamento cambia il massimo valore della sovracorrente. Vogliamo valutare se la rete di disaccoppiamento lascia una sovratensione residua verso rete e se questa viene modificata dal valore dell'induttore di disaccoppiamento.

Anche in questo caso è stato considerato un impulso applicato con un ritardo di 20 ms. Questo permette di poter valutare la forma d'onda di tensione sia prima che dopo l'applicazione della sovratensione.

Caso accoppiamento linea-linea

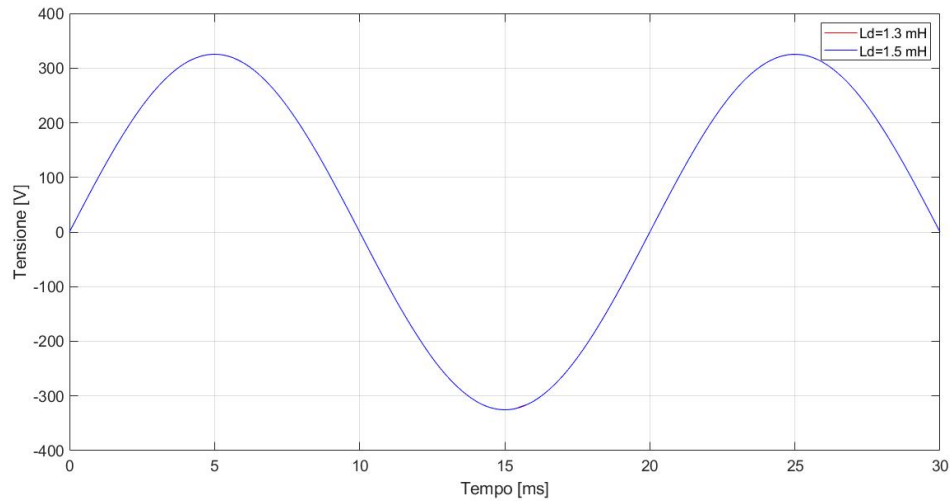


Figura 4.16: Confronto tra le forme d'onda in ingresso alla rete di disaccoppiamento

Non si verificano sovratensioni per entrambi i valori di induttanza, non è inoltre possibile rilevare variazioni di fase o ampiezza.

Caso accoppiamento linea-terra

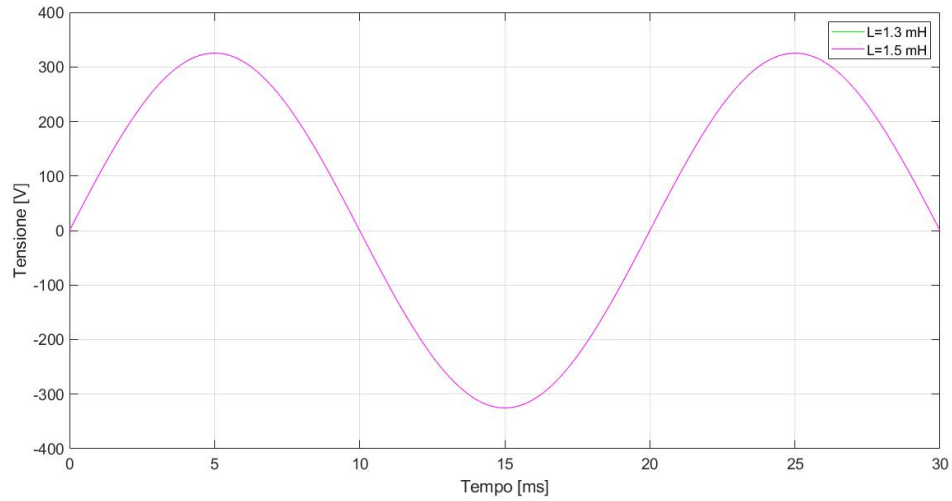


Figura 4.17: Confronto tra le forme d'onda in ingresso alla rete di disaccoppiamento

Anche con questo tipo di collegamento non sono riscontrabili variazioni della tensione verso rete.

4.2.5 Tensioni e correnti di picco di ciascun componente

Connessione linea-linea

Vengono esplicitati in forma tabellare i valori di picco di tensione e corrente su ciascun componente della rete CDN considerando un impulso da 10 kV di prova con morsetti dell'elemento di prova lasciati aperti.

Tabella 4.3: Valori di picco rete di accoppiamento per connessione linea-linea

Componenti rete di accoppiamento	
Componente	Ca
Modulo [μF]	18
Corrente di picco [A]	167.3
Tensione di picco ai suoi capi [V]	2060

Tabella 4.4: Valori di picco sui condensatori della rete di disaccoppiamento per connessione linea-linea

Componenti rete di disaccoppiamento			
Componente	Cd1	Cd2	Cd3
Modulo [μF]	30	30	30
Corrente di picco [A]	3.06	1.55	1.51
Tensione di picco ai suoi capi [V]	330	165	165

Tabella 4.5: Valori di picco sugli induttori della rete di disaccoppiamento per connessione linea-linea

Componenti rete di disaccoppiamento		
Componente	Ld1	Ld2
Modulo [mH]	1.5	1.5
Corrente di picco [A]	167.3	157.8
Tensione di picco ai suoi capi [V]	5000	5000

Connessione linea-terra

Per la connessione linea-terra consideriamo morsetti dell'elemento di prova cortocircuitati con una resistenza da 13 Ω .

Tabella 4.6: Valori di picco rete di accoppiamento per connessione linea-terra

Componenti rete di accoppiamento	
Componente	Ca
Modulo [μF]	9
Corrente di picco [A]	325
Tensione di picco ai suoi capi [V]	2700

Tabella 4.7: Valori di picco rete di accoppiamento per connessione linea-terra

Componenti rete di accoppiamento	
Componente	Ra
Modulo [Ω]	10
Corrente di picco [A]	325
Tensione di picco ai suoi capi [V]	3270

Tabella 4.8: Valori di picco sui condensatori della rete di disaccoppiamento per connessione linea-terra

Componenti rete di disaccoppiamento			
Componente	Cd1	Cd2	Cd3
Modulo [μF]	30	30	30
Corrente di picco [A]	3.09	165	162
Tensione di picco ai suoi capi [V]	326	410	410

Tabella 4.9: Valori di picco sugli induttori della rete di disaccoppiamento per connessione linea-terra

Componenti rete di disaccoppiamento		
Componente	Ld1	Ld2
Modulo [mH]	1.5	1.5
Corrente di picco [A]	187	89
Tensione di picco ai suoi capi [V]	8410	7700

4.3 Generalità componenti reattivi

4.3.1 Condensatore

I condensatori sono componenti elettronici che immagazzinano, filtrano e regolano l'energia elettrica ed il flusso di corrente; rappresentano uno dei componenti reattivi principali utilizzati nei circuiti. Vengono utilizzati principalmente per immagazzinare carica elettrica, condurre corrente alternata e bloccare (o separare) i diversi livelli di voltaggio provenienti da una fonte di corrente continua.

Distinguiamo le capacità a seconda del materiale con cui sono costruite, ciascun tipo di condensatore presenterà caratteristiche e benefici unici. Comprendere come vengono costruiti i condensatori e come i differenti materiali ne modificano le caratteristiche aiuta nella scelta del condensatore per una determinata applicazione. L'unità di misura è il Farad (F).

Tutti i condensatori presentano una stessa struttura base: due elettrodi metallici piatti vengono separati da un materiale non conduttore detto dielettrico. Quando la differenza di potenziale tra i due elettrodi supera il valore di rottura del dielettrico si verifica arco elettrico. Questa struttura permette di accumulare ed immagazzinare energia e causa una forza meccanica tra le due armature.

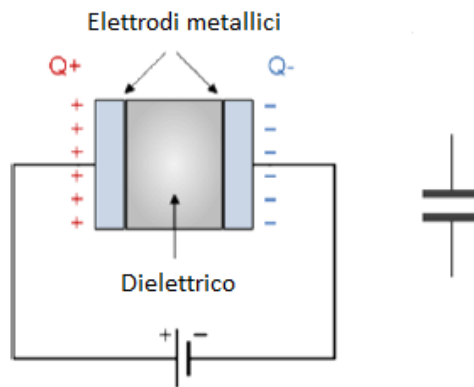


Figura 4.18: Struttura del condensatore

Nella scelta del dielettrico è possibile un'ampia gamma di materiali, ciascuno presenterà caratteristiche proprie e necessita di soluzioni costruttive anche strutturalmente molto differenti. Il valore della capacità sarà funzione della distanza tra le armature d , della loro area A e di un coefficiente detto costante del dielettrico ϵ .

$$C = \frac{A\epsilon}{d} \quad (4.1)$$

Rispetto all'utilizzo del vuoto come materiale presente tra le due armature, utilizzando dielettrici differenti il valore di ε cresce: ad esempio utilizzando carta esso è 5 volte superiore, utilizzando materiali ceramici può essere anche 90 volte più grande.

Il catalogo della Kemet (noto costruttore di componenti elettronici) fornisce un grafico utile per la scelta del tipo di condensatore in realizzazione al valore di capacità richiesto:

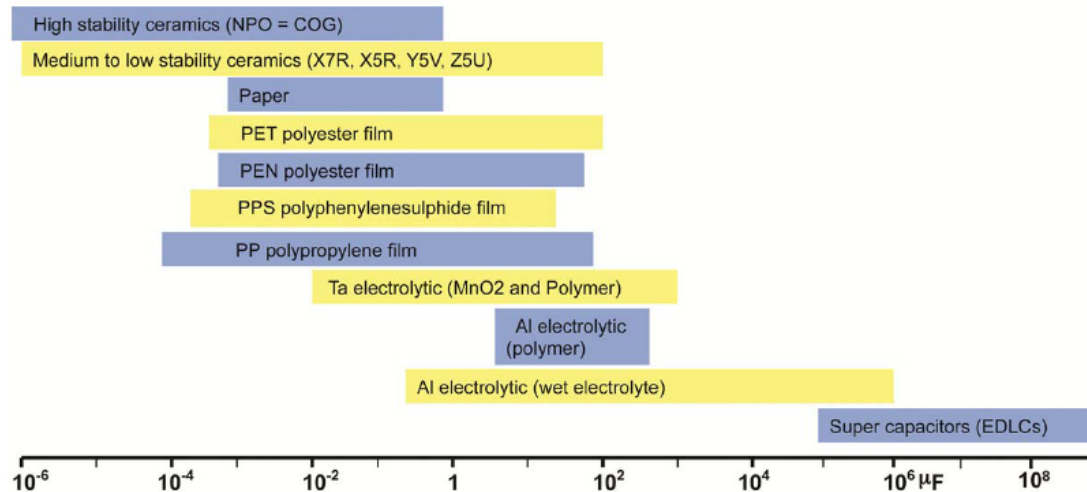


Figura 4.19: Scelta di condensatori al variare della capacità fornita dalla Kemet

I condensatori presentano una capacità nominale a cui vanno però aggiunti altri fattori per determinare l'effettiva capacità disponibile. Infatti il dielettrico può causare variazioni di capacità in quanto dipende da:

- Temperatura e umidità
- Voltaggio DC e AC
- Frequenza
- Età del condensatore
- Meccanica presente
- Effetti piezoelettrici

Nel momento in cui selezioniamo un condensatore questi fattori vengono tenuti in considerazione in quanto sul catalogo viene fornito un valore di capacità associato ad una determinata tolleranza. Questa spesso viene indicata in forma numerica con associato un campo di utilizzo in termini di temperatura in cui far lavorare il condensatore.

Nel caso in cui si esca dal campo di utilizzazione del condensatore (cioè viene applicata ai suoi capi una caduta di tensione abbondantemente superiore ai limiti fissati) si verifica

la rottura del dielettrico. L'area distrutta del dielettrico può rimanere permanentemente danneggiata e rendere il condensatore inutilizzabile.

Attraverso la costruzione di dielettrico ed elettrodi è possibile fare in modo che la capacità si protegga da sola; ad esempio condensatori in carta o a film con elettrodi sottilissimi sono in grado di auto-protegersi. Anche questa possibilità costruttiva è frutto di una scelta fatta in fase preliminare.

In forma generale possiamo classificare i condensatori in due macrocategorie: elettrostatici ed elettrolitici.

I condensatori elettrostatici sono componenti simmetrici apolari. Per il dielettrico si utilizzano materiali come film in plastica o ceramica mentre per gli elettrodi sono possibili molti tipi di metalli. Finché non vengono polarizzati i suoi terminali possono essere posti in un punto qualunque del circuito. Vengono in genere scelti per applicazioni in cui è richiesto un valore piccolo e preciso di capacità.

I condensatori elettrolitici sono invece costruzioni con comportamento polare ma asimmetrici. Utilizzano elettroliti che mantengono il dielettrico ma possono anche creare una connessione negativa (catodo). La connessione positiva (anodo) viene ottenuta da fogli di metalli quali alluminio. Lo strato di dielettrico è ottenuto applicando un leggero strato di ossido sull'anodo metallico. In generale il beneficio che si ottiene dall'utilizzo di condensatori elettrolitici è che permettono di ottenere elevati valori di capacità in spazi ridotti ma una volta polarizzati devono essere inseriti in una parte del circuito adeguata.

Oltre che per il disaccoppiamento e l'accoppiamento già evidenziati in questo elaborato, i condensatori vengono utilizzati anche per altre prestazioni che sono in grado di fornire:

- Filtraggio

Una delle applicazioni più diffusa per i condensatori è il filtraggio per rimuovere i segnali provenienti da frequenze indesiderate. Sfruttando l'alta impedenza del condensatore ad alte frequenze (e riducendola per basse frequenze) un filtro RC può essere utilizzato per rimuovere le interferenze ad alta frequenza come ad esempio il rumore in un segnale analogico. Componendo resistenze, induttori e condensatori possiamo ottenere vari tipi di filtro.

- Timing e formazione di forme d'onda

Il modo in cui un condensatore si carica e si scarica attraverso una resistenza può essere utilizzato per cronometrare diversi fenomeni, come ad esempio introdurre un ritardo in una forma d'onda. Variando i valori di capacità e resistenza è possibile realizzare circuiti che controllano la velocità di varie funzioni.

- Oscillatori

Utilizzandoli con elementi induttivi, i condensatori possono essere utilizzati per generare accurate forme d'onda sinusoidali.

4.3.2 Induttore

L'induttore rappresenta la proprietà di un circuito di opporsi alla variazione di corrente sotto forma di forza contro elettromotrice autoindotta. L'induttore elementare è realizzato avvolgendo un filo di materiale conduttore in modo da ottenere una bobina, l'unità di misura dell'induttanza è l'Henry.

Nella fase di progetto di un induttore possiamo far riferimento a quattro vincoli costruttivi da rispettare per poter così ottenere il funzionamento desiderato senza danneggiamenti del componente. Prima di elencarli effettuiamo dei passaggi preliminari per poter così definire tutti i termini coinvolti.

Per prima cosa assumiamo di poter trascurare le perdite nel nucleo magnetico, il termine dominante nella valutazione delle perdite è quello per le basse frequenze.

L'induttore reale può essere modellizzato dalla serie dell'induttore stesso con una resistenza dove la componente resistiva serve a tener conto delle perdite degli avvolgimenti. Noto il valore della resistenza parassita r possiamo ricavare le perdite ad essa connesse:

$$P_{cu} = I_{rms}^2 r \quad (4.2)$$

Per fare delle valutazioni inerenti al comportamento induttivo al variare dei parametri ad esso legati facciamo riferimento al circuito induttivo in Figura 4.20

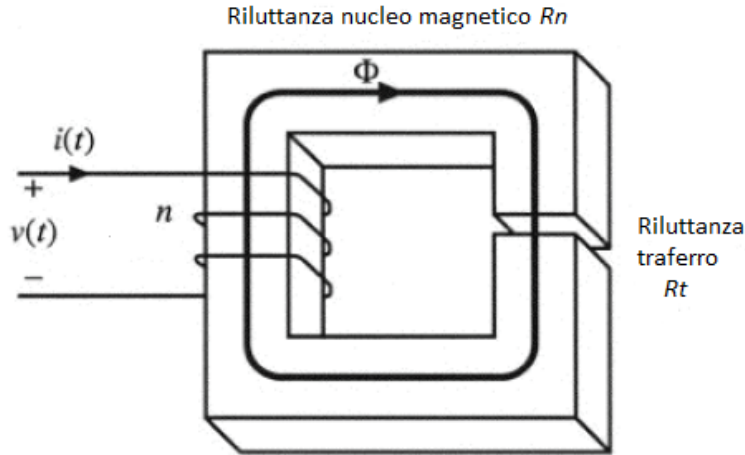


Figura 4.20: Elementi del circuito magnetico

I termini R sono riluttanze, esse vengono calcolate come:

$$R = \frac{l}{\mu A} \quad (4.3)$$

dove A è l'area della sezione trasversale di traferro o nucleo magnetico, l la sua lunghezza e μ la permeabilità del materiale considerato. Poiché la permeabilità del materiale che compone il nucleo magnetico è molto superiore a quella del traferro si considera per semplicità la sola reattanza del traferro indicandola con R_t di qui in avanti.

$$ni = \Phi(R_t + R_n) = \Phi R_t = B A_n R_t \quad (4.4)$$

con A_n area della sezione del nucleo.

Passiamo allora ad elencare i vincoli costruttivi legati ai valori voluti di:

1. Massima densità di flusso

In presenza della massima corrente vogliamo che il flusso magnetico B prodotto (che corrisponde quindi a quello massimo) sia lontano dalla saturazione del componente:

$$nI_{max} = B_{max} A_n R_t = B_{MAX} \frac{l_t}{\mu_0} \quad (4.5)$$

2. Induttanza

$$L = \frac{n^2}{l_t} = \frac{\mu_0 A_n n^2}{l_t} \quad (4.6)$$

3. Area disponibile per gli avvolgimenti

L'avvolgimento deve girare attorno nucleo magnetico. Detta A_w l'area della sezione del conduttore che forma l'avvolgimento, se sono presenti n avvolgimenti avremo un area delle sezioni pari a $n A_w$. Se il nucleo magnetico presenta area W_a possiamo esprimere l'area disponibile per gli avvolgimenti come $K_u \cdot W_a$ dove K_u è il fill factor o ed è esprimibile come la divisione tra la sezione di materiale magnetico avvolta dal rame e il materiale magnetico vero e proprio (varia quindi tra 0 e 1). Il valore di K_u oscilla tra 0.7 e 0.45 a seconda delle applicazioni.

$$K_u W_a \geq n A_w \quad (4.7)$$

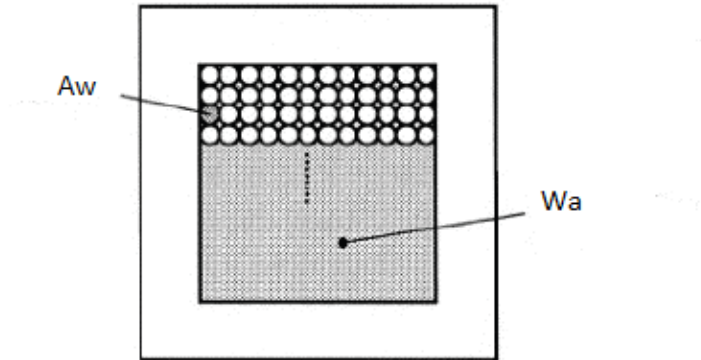


Figura 4.21: Aree considerate per il fattore K_u

4. Resistenza degli avvolgimenti

$$r = \rho \frac{l_t}{A_W} = \rho \frac{nMLT}{A_W} \quad (4.8)$$

dove MLT è la lunghezza media della spira (*Mean Length per Turn*).

A questo punto possiamo unire le quattro equazioni che forniscono i vincoli rimuovendo i termini n , l_g e A_W (che non sono noti) ottenendo la disuguaglianza finale:

$$\frac{A_c^2 W_a}{MLT} \geq \frac{\rho L^2 I_{max}^2}{B_{max}^2 R K_u} \quad (4.9)$$

I termini a destra di questa disuguaglianza sono o specifiche o termini noti, la parte a sinistra è invece funzione della geometria del nucleo magnetico e viene detto fattore geometrico K_g . E' un termine che descrive l'effettiva dimensione elettrica del nucleo magnetico in applicazioni in cui le perdite nel rame e la densità di flusso sono specificate.

La disuguaglianza appena trovata descrive come le specifiche varino il nucleo magnetico. Al crescere dell'induttanza o del picco di corrente cresce la dimensione richiesta per il nucleo. Se invece aumentiamo la densità di flusso diminuisce il nucleo magnetico richiesto. Aumentare la resistenza degli avvolgimenti porta a ridurre il nucleo, ma ovviamente cresceranno le perdite e nascono problematiche ulteriori in quanto il sistema si scalda.

4.4 Ricerca di mercato

Per effettuare la ricerca di mercato sono partito dai valori nominali e di picco in termini di tensione e corrente raggiunti durante le simulazioni dagli elementi di prova.

Una volta ottenuti questi parametri ho potuto associare ad ogni componente reattivo i picchi raggiunti e quindi i suoi punti di rottura. Questo è particolarmente importante per il condensatore in quanto superare la massima tensione sopportabile dal dielettrico porta alla distruzione del componente in maniera irreversibile.

Per poter procedere all'acquisto sono stati consultati i cataloghi online di vari costruttori e rivenditori:

- RS;
- Farnell;
- Digikey;
- Mouser;
- Celem;
- Coilkraft.

L'elemento più difficile da trovare costruito singolarmente (senza cioè effettuare strutture composte da più elementi in serie o parallelo) è senza dubbio il condensatore di accoppiamento. Infatti per questo elemento è richiesto un alto valore di capacità ($9\ \mu F$ o $18\ \mu F$ a seconda di come colleghiamo il generatore) con però un dielettrico in grado di non degradarsi con tensioni ai suoi capi che arrivano anche a 2.5 kV di picco.

I datasheet dei componenti selezionati tramite ricerca di mercato sono presenti nell'Allegato per poter così fornire indicazione sulle prestazioni in maniera più completa.

4.4.1 Condensatore di disaccoppiamento

Per la scelta del condensatore di disaccoppiamento consideriamo i valori di picco di tensione e corrente delle tre capacità e selezioniamo un unico componente. Verranno acquistati tre condensatori uguali in modo da poterli scambiare e ottenere un degrado omogeneo dei componenti.

Tabella 4.10: Prestazioni richieste al condensatore di disaccoppiamento

Condensatore di disaccoppiamento			
	Valore di picco	Valore nominale	Unità di misura
Capacità	-	30	$[\mu F]$
Tensione	410	230	[V]
Corrente	165	25	[A]

Questo risulta essere il componente più semplice da reperire sul mercato, sono possibili varie soluzioni in quanto la massima tensione che il componente deve sopportare è di molto inferiore a quella che caratterizza l'impulso di prova.

Una possibile soluzione è rappresentata dal KEMET C44AMGP5300ZA0J, questo condensatore è già da $30 \mu F$ e non è quindi necessario effettuare collegamenti in serie o parallelo di più componenti. Poiché sia per il collegamento linea-linea che per quello linea-terra vengono utilizzati 3 capacità per il disaccoppiamento sarà necessario acquistarne 3. Per semplicità è stato considerato il caso peggiore in termini di tensioni di picco per poter così invertire i condensatori tra loro senza necessità di dover considerare tra quali conduttori vengono connessi.

4.4.2 Induttore di disaccoppiamento

Consideriamo i valori di picco di tensione e corrente sui due induttori e selezioniamo un unico componente. Sarà necessario progettare due induttori uguali in modo da poterli scambiare e ottenere un degrado omogeneo dei componenti.

Tabella 4.11: Prestazioni richieste all'induttore di disaccoppiamento

Induttore di disaccoppiamento			
	Valore di picco	Valore nominale	Unità di misura
Induttanza	-	1.5	[mH]
Corrente	187	25	[A]
Tensione	8410	230	[V]

Questo elemento è difficile da reperire sul mercato in quanto presenta valore di induttanza e prestazioni elevate. In condizioni di normale funzionamento l'induttore è percorso da una corrente di 25 A, ma quando viene applicato l'impulso la corrente raggiunge il valore di 187 A. Occorre allora considerare una corrente di saturazione di molto superiore a quella di normale esercizio.

Poiché non è presente sul mercato un induttore con queste caratteristiche sarà necessario realizzarne uno all'interno del dipartimento.

Per fornire una progettazione preliminare utilizziamo le indicazioni già espresse nel paragrafo precedente relative alla progettazione degli induttori [16]. I dati in ingresso sono quelli espressi in Tabella:

Tabella 4.12: Prestazioni richieste all'induttore di disaccoppiamento

Prestazioni induttore di disaccoppiamento		
	Modulo	Unità di misura
Induttanza	1.5	[mH]
Corrente massima	200	[A]
Induzione massima	1.6	[T]
Sezione nucleo magnetico	20	[cm ²]
Resistenza avvolgimenti	1	[Ω]
Fattore Ku	0.5	-
Resistività spira	1.724×10^{-6}	[Ω - cm]

L'induttore dovrà avere le seguenti caratteristiche:

Tabella 4.13: Caratteristiche di progettazione dell'induttore di disaccoppiamento

Caratteristiche induttore di disaccoppiamento		
	Modulo	Unità di misura
Numero di spire	87	-
Fattore Al	200	[mH/1000 giri]
Lunghezza traferro	12.6	[mm]
Fattore Kg	10.37	-

4.4.3 Condensatore di accoppiamento

Come visto in precedenza il condensatore di accoppiamento può essere da $9 \mu F$ se utilizziamo una connessione linea-terra del generatore o da $18 \mu F$ se invece si preferisce la connessione linea-linea:

Tabella 4.14: Prestazioni richieste al condensatore di accoppiamento linea-terra

Condensatore di accoppiamento linea-terra		
	Modulo	Unità di misura
Capacità	9	$[\mu F]$
Tensione di picco	2700	[V]
Corrente massima	325	[A]

Tabella 4.15: Prestazioni richieste al condensatore di accoppiamento linea-linea

Condensatore di accoppiamento linea-linea		
	Modulo	Unità di misura
Capacità	18	$[\mu F]$
Tensione di picco	2060	[V]
Corrente massima	167.3	[A]

Condensatori dei microonde, sono presenti sul mercato ma devo cercare una struttura che ne possa contenere 10-20 in parallelo.

Il problema dei condensatori a microonde è che è difficile reperire sul mercato condensatori in grado di sopportare tensioni superiori a 2100 V, questo fa sì che sia possibile per i nostri scopi effettuare delle prove solamente con accoppiamento linea linea.

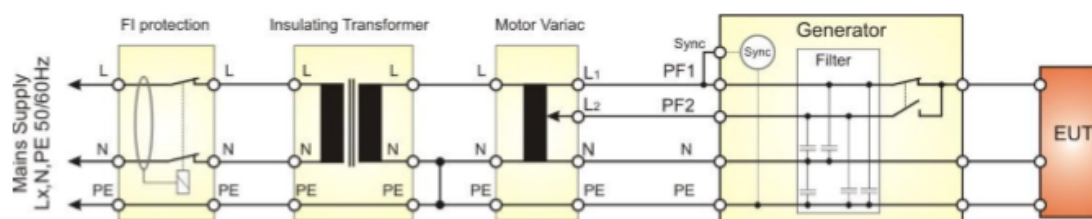
Una possibile soluzione è rappresentata dal condensatore a film sottile WIMA 505-SNMPW041508L1GKS da $1.5 \mu F$.

Questo è da $1.5 \mu F$, occorre quindi acquistarne 12. Dovranno essere realizzate poi due strutture composte dal parallelo di 6 condensatori con la possibilità di connettere in parallelo le due strutture stesse.

Così facendo potremo realizzare:

- la connessione linea-linea connettendo le due strutture e ottenendo così una capacità totale da $18 \mu F$;
- la connessione linea-terra in cui verrà utilizzata una sola struttura da 6 condensatori in parallelo (dal valore di $9 \mu F$) posta in serie ad un resistore da 10Ω .

E' necessario allora prevedere un trasformatore di isolamento. Una soluzione consigliata sul catalogo del generatore di impulsi presente in laboratorio è quella rappresentata in Figura 4.22:



Viene utilizzato un Motor Variac che è un autotrasformatore variabile, tuttavia questo (non disponendo di un secondario), non garantisce l'isolamento galvanico e porta con sé un potenziale pericolo. Viene allora posto in cascata ad un trasformatore di isolamento per consentire la sicurezza dell'impianto.

77

Conclusioni

Il lavoro di ricerca da me effettuato ha permesso di identificare gli interventi necessari per:

- migliorare le condizioni di sicurezza del laboratorio per la verifica delle sovratensioni del DENERG del Politecnico di Torino;
- permettere un ampliamento delle prove di tenuta all'impulso;
- migliorare il sistema di misura utilizzato durante le prove.

Successivamente è stata esplicitata la procedura di prova e la strumentazione necessaria per poter effettuare dei test di tenuta alle sovratensioni.

Viene posta particolare attenzione sulla necessità di acquistare una rete di accoppiamento e una di disaccoppiamento o eventualmente realizzarle entrambe all'interno del dipartimento.

La rete di accoppiamento è indispensabile per permettere il collegamento del generatore all'elemento di prova mentre questo è alimentato. Diventa così possibile applicare un impulso di tensione durante il normale funzionamento dell'EUT.

La rete di disaccoppiamento fa sì che l'impulso applicato non vada verso la rete di alimentazione. Non deve esserci una caduta di tensione eccessiva su questa rete mentre alimentiamo il sistema e allo stesso tempo deve essere in grado di limitare l'impulso di tensione alla porzione di circuito interessata alla prova.

Una volta determinati i componenti che formano la rete di accoppiamento e quella di disaccoppiamento è stata effettuata una ricerca di mercato per valutare la reperibilità dei componenti reattivi.

I condensatori che formano la rete di accoppiamento durante l'applicazione dell'impulso possono raggiungere una tensione ai loro capi di 2,5 kV. Poichè non sono presenti sul mercato condensatori in grado di non degradare il proprio dielettrico per questi valori di tensione (fissata la capacità richiesta) viene proposta la messa in parallelo di più componenti per permettere così la realizzazione della rete di accoppiamento.

Per la rete di disaccoppiamento invece occorre distinguere tra condensatori e induttori.

I condensatori sono facilmente reperibili sul mercato in quanto la tensione a cui vengono sottoposti durante la prova non superano mai i 450 V.

Gli induttori invece richiedono un valore di induttanza elevato ma soprattutto durante l'applicazione dell'impulso sono percorsi da correnti di poco inferiori a 185 A. Sul

mercato non sono presenti induttori con queste caratteristiche e se ne consiglia allora la progettazione.

Una volta realizzata la CDN sarà possibile utilizzare il mio lavoro di tesi e il protocollo di prova espresso per effettuare test di verifica all'impulso su apparecchi elettronici di vario genere.

Un elemento di particolare interesse di studio è rappresentato dalla lampada a LED per esterni. Queste lampade hanno sempre maggiore diffusione ma il circuito elettronico presente al loro interno è sensibile alle variazioni repentine di tensione introdotte da scariche atmosferiche che colpiscono la lampada o l'ambiente in prossimità di essa.

Utilizzando il generatore di sovratensioni presente in laboratorio è possibile simulare queste scariche e applicarle alla lampada mentre questa è nel suo normale funzionamento connettendola alla rete CDN progettata.

Elenco delle tabelle

2.1	Caratteristiche richieste all'oscilloscopio	22
2.2	Componenti rete di accoppiamento	26
2.3	Componenti rete di disaccoppiamento	27
4.1	Parametri rete di accoppiamento	54
4.2	Parametri rete di disaccoppiamento	54
4.3	Valori di picco rete di accoppiamento per connessione linea-linea	65
4.4	Valori di picco sui condensatori della rete di disaccoppiamento per connessione linea-linea	65
4.5	Valori di picco sugli induttori della rete di disaccoppiamento per connessione linea-linea	65
4.6	Valori di picco rete di accoppiamento per connessione linea-terra	66
4.7	Valori di picco rete di accoppiamento per connessione linea-terra	66
4.8	Valori di picco sui condensatori della rete di disaccoppiamento per connessione linea-terra	66
4.9	Valori di picco sugli induttori della rete di disaccoppiamento per connessione linea-terra	66
4.10	Prestazioni richieste al condensatore di disaccoppiamento	73
4.11	Prestazioni richieste all'induttore di disaccoppiamento	74
4.12	Prestazioni richieste all'induttore di disaccoppiamento	74
4.13	Caratteristiche di progettazione dell'induttore di disaccoppiamento	75
4.14	Prestazioni richieste al condensatore di accoppiamento linea-terra	75
4.15	Prestazioni richieste al condensatore di accoppiamento linea-linea	75

Elenco delle figure

1.1	Danni apparecchiature elettroniche AVIVA	9
1.2	Scarica di origine atmosferica	11
1.3	Fulminazione diretta edificio	12
1.4	Fulminazione indiretta edificio	12
1.5	Fulminazione diretta linea	12
1.6	Fulminazione indiretta linea	13
1.7	Densità di fulmini per zona geografica	13
1.8	Andamento sovratensione transitoria	14
1.9	Confronto tra le sovratensioni	16
1.10	Esempio di varistore	17
1.11	Esempio di SPD	19
2.1	Circuito equivalente del generatore	24
2.2	Forma d'onda tensione circuito aperto dalla norma CEI 61000 4-5	25
2.3	Forma d'onda corrente in cortocircuito dalla norma CEI 61000 4-5	25
2.4	Connessione Linea-Terra secondo la Norma CEI 61000 4-5	27
2.5	Connessione Linea-Linea secondo la Norma CEI 61000 4-5	28
2.6	Livelli di prova alle porte di ingresso dall'alimentazione in alternata [7]	31
2.7	Valori di tensione a circuito aperto consigliati per la prova dalla CEI 61547	31
2.8	Distanze utilizzate dalla CEI 50191	33
2.9	Tabella in cui sono indicate le distanze da rispettare secondo la CEI 50191	33
2.10	Elettromagnete di chiusura porte	34
2.11	Comando a due mani	35
3.1	Laboratorio presente nel DENERG del Politecnico di Torino	37
3.2	Locale in cui si trova l'operatore e il generatore di impulsi	38
3.3	Locale in cui viene posto l'elemento di prova	38
3.4	Dorma modello Tv200	40
3.5	Windowo modello 12800M	41
3.6	Serai modello EM02	41
3.7	Esempio di disposizione dei componenti fornito sul catalogo degli elettromagneti Opera	42
3.8	Comando a due mani	43
3.9	Generatore utilizzato in Laboratorio	45

3.10	Circuito equivalente del generatore	45
3.11	Schema a blocchi generatore	47
3.12	Schematizzazione per la verifica degli impulsi	48
4.1	Rete CDN caso collegamento linea linea	51
4.2	Rete CDN caso collegamento linea terra	51
4.3	Impianto di prova utilizzato dal team della Wuhan University	53
4.4	Carico puramente resistivo	55
4.5	Carico con resistenza e capacità	55
4.6	Punti in cui vengono misurati tensione (verde) e corrente (rosso)	56
4.7	Punti in cui vengono misurati tensione (verde) e corrente (rosso)	56
4.8	Confronto tra le forme d'onda in ingresso all'EUT	57
4.9	Confronto tra le forme d'onda in ingresso all'EUT	58
4.10	Confronto tra le forme d'onda in ingresso all'EUT	58
4.11	Confronto tra le forme d'onda in ingresso all'EUT	59
4.12	Punti in cui vengono misurati tensione (verde) e corrente (rosso)	60
4.13	Punti in cui vengono misurati tensione (verde) e corrente (rosso)	61
4.14	Confronto tra le forme d'onda in ingresso alla rete di disaccoppiamento	61
4.15	Confronto tra le forme d'onda in ingresso alla rete di disaccoppiamento	62
4.16	Confronto tra le forme d'onda in ingresso alla rete di disaccoppiamento	63
4.17	Confronto tra le forme d'onda in ingresso alla rete di disaccoppiamento	64
4.18	Struttura del condensatore	67
4.19	Scelta di condensatori al variare della capacità fornita dalla Kemet	68
4.20	Elementi del circuito magnetico	70
4.21	Aree considerate per il fattore Ku	71
4.22	Ipotesi di messa in sicurezza consigliata del costruttore del generatore utilizzato in laboratorio	77
A.1	Uscita del generatore per la messa a terra	86
A.2	Collegamento tra le lastre metalliche	86
A.3	Collegamento tra le lastre metalliche	86
A.4	Connessione della CDN per accoppiamento Linea-Linea	87
A.5	Connessione della CDN per accoppiamento Linea-Linea	87

Bibliografia

- [1] R. Napoli, Dispense del corso di Impianti Elettrici, Torino: Politecnico di Torino.
- [2] Norma CEI EN 34-156 , Guida per la protezione degli apparecchi di illuminazione con moduli LED dalle sovratensioni, CEI 2016-06.
- [3] E. De Palo, S. Minini, Fulmini e rischio di sovratensioni, disponibile su <http://switchtothefuture.com/fulmini-e-rischio-di-sovratensioni/>
- [4] Norma CEI EN 61000 4-5 , Compatibilità elettromagnetica, Parte 4-5: Tecniche di prova e misura - Prova di immunità ad impulso, CEI 2016-10.
- [5] EM TEST, User Manual VCS500Nx, Version 3.21/18.08.2014
- [6] F. Ferraris, Dispense del corso di Misure Elettriche, Torino: Politecnico di Torino.
- [7] Norma CEI EN 61547 , Apparecchiature per l'illuminazione generale - Prescrizioni di immunità EMC, CEI 2010-03.
- [8] J. Gepner, Messa in servizio degli impianti elettrici nelle strutture critiche, disponibile su <https://www.schneider-electric.it/it/work/insights/commissioning-electrical-systems-in-mission-critical-facilities.jsp>
- [9] Norma CEI EN 50191 , Installazione ed esercizio degli impianti elettrici di prova, CEI 2011-11.
- [10] P. Arona, Il rischio elettrico nel laboratorio di elettrotecnica, Torino: IIS G. Galilei di Torino.
- [11] Cooper Safety, Technical Data Magnetic Door Holder, disponibile su <http://www.coopercsa.it/>
- [12] M. Casalino, Illuminazione pubblica a LED e protezione contro le sovratensioni, Torino: Politecnico di Torino, Tesi di Laurea Magistrale 2016.
- [13] Impresa Sicura, "Dispositivi di comando a due mani, disponibile su <http://www.sabbatiniconsulting.com>
- [14] M. Zhou, J. Wang, Y. Liu, F. Liu, Coupling and Decoupling Network for Surge Immunity Test on Power Lines, China: Wuhan University, 2008.
- [15] M. Zhou, H. Zhang, L. Cai, X. Fan, J. Wang, S. Dai, J. Xue, Surge Immunity Test of Personal Computer at Power Lines, China: Wuhan University, 2011.
- [16] R. Erickson, D. Maksimovic, Fundamentals of Power Electronics, Seconda edizione, 2000.

Allegati

Allegato A

Procedura di prova per la verifica di tenuta all'impulso

Viene esposta la procedura di prova per poter effettuare delle prove di tenuta all'impulso rispettando i vincoli espressi dalle normative. Possiamo suddividere la procedura di prova utilizzando vari passaggi:

- collegamento della strumentazione;
- verifica della strumentazione;
- esecuzione della prova;

A.1 Collegamento della strumentazione

Per prima cosa occorre verificare che il generatore di sovratensioni sia posto su un tavolo sulla cui superficie sono presenti lastre metalliche. Tali lastre dovranno essere presenti anche al di sotto del tavolo sul piano in cui poggia l'operatore.

Sul retro del generatore è presente un'uscita per permettere la messa a terra, occorre connettere tale uscita con il piano metallico del tavolo come in Figura A.1:

Successivamente connettiamo il piano su cui poggia l'operatore alle lastre metalliche presenti sul tavolo come rappresentato nelle Figure A.2 e A.3:

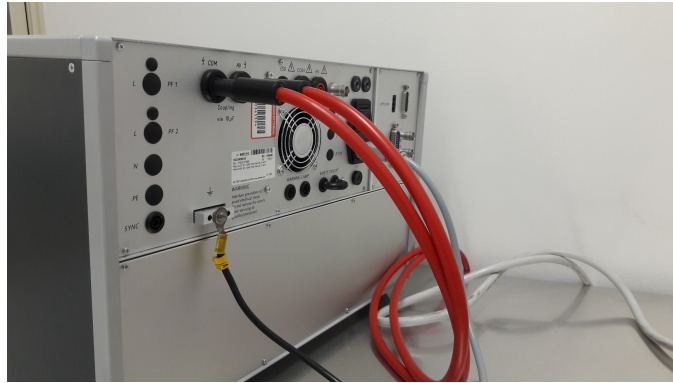


Figura A.1: Uscita del generatore per la messa a terra

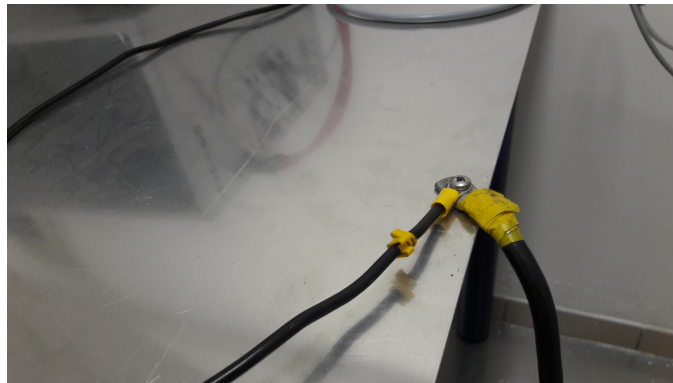


Figura A.2: Collegamento tra le lastre metalliche



Figura A.3: Collegamento tra le lastre metalliche

A questo punto è possibile connettere i cavi forniti con il generatore alle uscite presenti sul retro di esso, tali cavi verranno fatti passare nelle aperture nel muro per uscire così nel locale attiguo in cui è presente l'elemento di prova. Sul tavolo su cui è posto l'EUT occorre applicare una lastra metallica che garantisca l'equipotenzialità.

Una volta identificati i morsetti di alimentazione dell'elemento di prova occorre disalimentarlo e connettere la rete di accoppiamento/disaccoppiamento progettata scegliendo il tipo di connessione del generatore:

- Linea-Linea

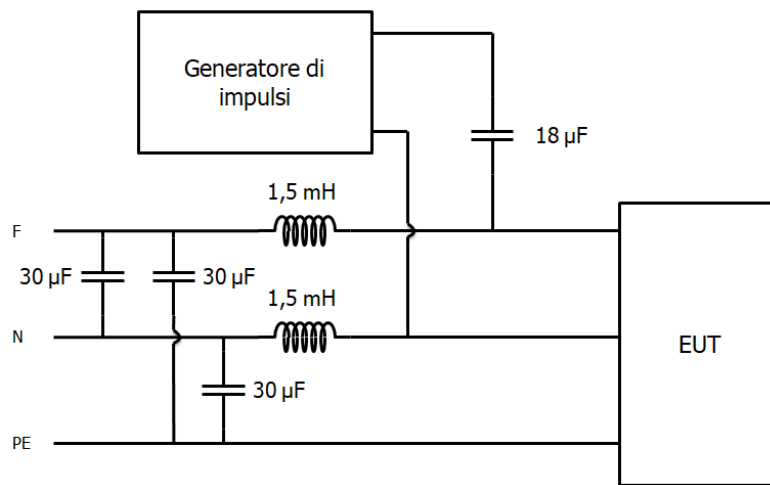


Figura A.4: Connessione della CDN per accoppiamento Linea-Linea

- Linea-Terra

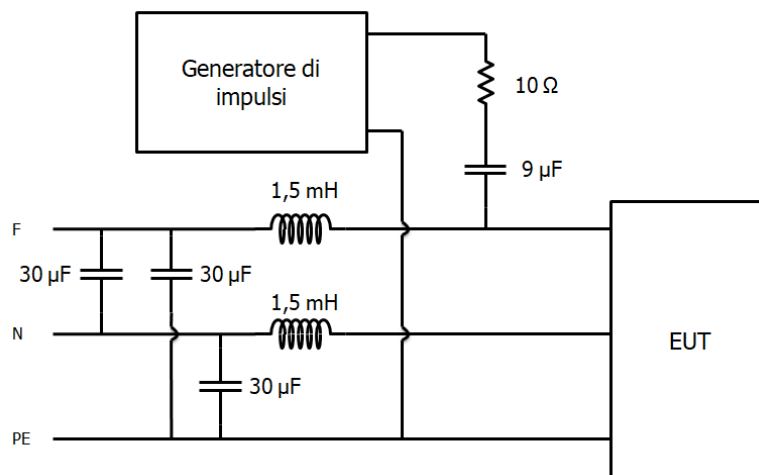


Figura A.5: Connessione della CDN per accoppiamento Linea-Linea

Il generatore VCS500N10 è provvisto di due uscite dalle quali si può prelevare la corrente e la tensione durante le prove. La massima tensione in uscita dai connettori è di $10V \pm 10\%$ e che corrisponde al massimo di tensione che il generatore può fornire: in questo caso 10kV e 5kA. Quindi non è necessario inserire un partitore (resistivo o capacitivo) per la lettura, ma bastano due semplici cavi coassiali che trasferiscano l'informazione ad un oscilloscopio. Sia la tensione che la corrente vengono letti in Volt tramite una sonda che attenua il segnale di dieci volte.

L'oscilloscopio LeCroy presente in laboratorio è provvisto di uscita USB per il salvataggio dei dati su periferica esterna, di modo da facilitare l'elaborazione dei dati. Esso presenta una frequenza di campionamento di 200MHz, sufficiente a campionare i 30 campioni consigliati dalla normativa per la valutazione del test.

A.2 Verifica della strumentazione

In questa fase viene utilizzato il generatore di impulsi, occorre quindi che i requisiti di sicurezza prescritti dalla CEI 50191 siano rispettati. Prima di iniziare la prova è necessario verificare che non sia possibile accedere al laboratorio da parte di personale esterno. Nel caso in cui vengano utilizzati elettromagneti di chiusura porte occorre che il segnale di blocco venga mandato prima dell'inizio delle prove di verifica.

Prima di alimentare l'elemento di prova e successivamente azionare il generatore occorre verificare che gli impulsi generati rispettino le prescrizioni normative. Per poter effettuare questa verifica sono necessarie due prove:

- Prova a circuito aperto;
- Prova in cortocircuito;

Entrambe le prove devono essere effettuate con lo stesso voltaggio, poiché il massimo impulso generabile è di 10 kV si consiglia di utilizzare questo voltaggio.

Per la prova in circuito aperto occorre che tra i due morsetti vi sia un'impedenza da almeno $10\text{ k}\Omega$, questa può essere raggiunta ad esempio utilizzando una scatola di cartone.

Per la prova in cortocircuito invece occorre utilizzare una resistenza da $0,1\text{ m}\Omega$ tra i due morsetti.

Le forme d'onda ottenute devono essere conformi a quelle indicate dalla CEI 61000 4-5. In particolare occorre verificare che la rete di accoppiamento/disaccoppiamento non porti ad una caduta di tensione eccessiva (superiore al 10% di quella nominale).

A.3 Esecuzione della prova

Una volta effettuati i test di verifica e aver messo in sicurezza l'area di prova possiamo connettere il generatore (ancora spento) e la rete di accoppiamento/disaccoppiamento ai morsetti dell'elemento di prova. Successivamente alimentiamo l'EUT e verifichiamo visivamente che funzioni in maniera ottimale (ad esempio per una lampada a LED che illumini senza particolari disturbi).

Una volta fatto ciò possiamo spostarci sul piano equipotenziale nel locale in cui è posto il generatore, effettuare il bloccaggio delle porte ed azionare il generatore di sovratensioni.

Per poter garantire la tenuta all'impulso dell'elemento di prova è necessario che esso non subisca danneggiamenti a seguito della procedura di test.

Fissato un valore di tensione impulsiva occorre stabilire se si lavora con porte di alimentazione in corrente continua o in corrente alternata:

1. Per porte di alimentazione in corrente continua si effettuano cinque scariche impulsive positive e cinque scariche impulsive negative.
2. Per porte di alimentazione in corrente alternata si effettuano cinque scariche impulsive positive e cinque scariche impulsive negative ma variando l'angolo di fase:
 - a 0° ;
 - a 90° ;
 - a 180° ;
 - a 270° .

Nel caso particolare in cui l'elemento di prova sia un apparecchio LED esistono normative specifiche [2] che consigliano di applicare i seguenti impulsi:

- cinque impulsi con polarità positiva e angolo di fase di 90° ;
- cinque impulsi con polarità negativa e angolo di fase 270° .

Tra un impulso e l'altro è necessario che trascorra un intervallo di tempo non superiore ai 60 secondi.

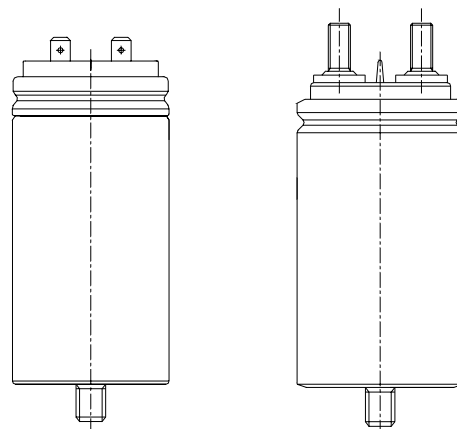
Una volta verificata la tenuta all'impulso di un valore di tensione possiamo passare ad un livello superiore. E' quindi consigliabile partire da impulsi di pochi kV e successivamente aumentare il voltaggio per eseguire altre prove fino ai 10 kV massimi erogabili dal generatore.

Allegato B

Data sheet componenti da acquistare

Vengono inseriti i datasheet dei componenti da acquistare, nell'ordine avremo:

1. Il condensatore di disaccoppiamento KEMET C44AMGP5300ZA0J;
2. Il condensatore di accoppiamento WIMA 505-SNMPW041508L1GKS;



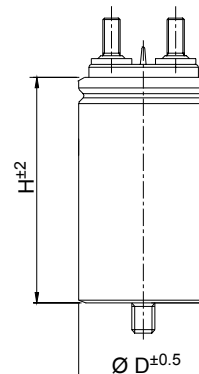
TECHNICAL DATA

General technical data	VDE 0560 , IEC 071 , EN 61071
Application class (DIN 40040)	GPD / LS
Temperature range (Case)	-40 to + 85 °C
Max permissible ambient temperature	+70 °C
Capacitance tolerance code (15 th digit)	J = ± 5% ; K = ± 10%
Test voltage terminal to case U _{TT}	1.5 U _{RMS} for 60 seconds
Test voltage terminal to case U _{TC}	3kV - 50Hz for 60 seconds
Rated insulation voltage U _i	700 V - 50 Hz - Insulation group B (VDE 0110 part 1)
Permissible relative humidity	Annual average ≤ 95% on 30 days / year, continuously 100% on other days occasionally 100%. Dewing not admissible
IEC climatic category	40 / 85 / 21
Degree of protection	IP00
Capacitance deviation in the operating temperature range of -40 to +85 °C	±1.5% max on capacitance value measured at +20 °C
Change of capacitance versus operating time	-3% after 30.000 hours at U _{RMS} or after 100.000 hours at U _n
Case components	Aluminium case plus plastic insulating deck flame retardant execution (UL class 94 V1) .
Terminals	Tinned brass fastons or screws (See figure on top)
Installation	Whatever Position
Life Expectancy	≥ 30.000 hours at U _{RMS} ; ≥ 100.000 hours at U _n
Failure quota	300 / 10 ⁹ components hour

MKP Series
 ALUMINIUM CASE CAPACITORS
 GENERAL PURPOSE APPLICATION
 SCREW TERMINALS

PEAK VOLTAGE TABLE

Un Vdc	U _{PK} Vdc	U _{RMS} Vac
700	900	400
850	1000	450

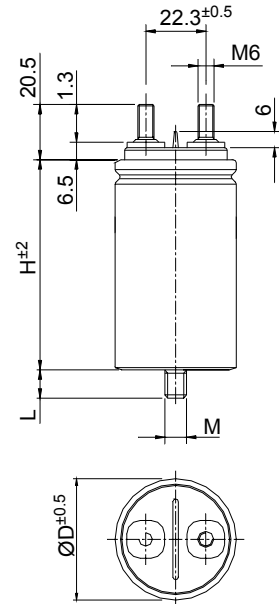

GENERAL CHARACTERISTICS

Code	C μF	Un Vdc	K °C/W	Tgδ x 10 ⁻⁴		ESR Typ. mΩ	dv/dt V/μs	I _{RMS} A	I _{PKR} A	Case		Approx Weight g
				Max	Typ.					D	H	
C44AJFP4500ZA0J	5	700	13.0	8	2	3	50	16	250	45	80	135
C44AJFP4600ZA0J	6	700	13.0	8	2	3	50	16	300	45	80	135
C44AJFP4750ZA0J	7.5	700	10.3	10	3	3	50	18	375	45	80	135
C44AJFP5100ZA0J	10	700	10.0	10	3	3	50	18	500	50	101	200
C44AJFP5150ZB0J	15	700	5.3	15	6	3	40	25	600	50	101	200
C44AJFP5200ZD0J	20	700	5.3	15	10	3	40	25	800	50	101	200
C44AJGP5220ZA0J	22	700	5.3	15	10	3	40	25	880	55	101	235
C44AJGP5250ZA0J	25	700	5.3	15	10	3	40	25	1000	60	101	240
C44AJGP5300ZB0J	30	700	5.3	15	12	3	30	25	900	60	138	310
C44AJGP5330ZA0J	33	700	5.3	15	10	3	35	25	990	60	138	310
C44AJGP5400ZA0J	40	700	4.0	25	15	4	35	32	1200	65	138	360
C44AJGP5500ZA0J	50	700	4.0	25	15	4	35	32	1500	65	138	360
C44AJGP5600ZA0J	60	700	4.0	25	15	4	30	32	1800	76	138	625
C44AJGP5700ZA0J	70	700	4.0	25	15	4	30	32	2100	76	138	625
C44AJGR5750ZA0J	75	700	4.0	25	15	4	30	32	2250	85	137	770
C44AJGR6100ZA0J	100	700	2.0	15	10	3	40	50	4000	85	185	1150
C44AMFP4300ZA0J	3	850	7.8	10	5	5	60	16	180	45	80	135
C44AMFP4500ZA0J	5	850	7.8	10	5	5	60	16	300	45	80	135
C44AMFP4600ZA0J	6	850	6.2	10	5	5	60	18	360	45	80	135
C44AMFP4800ZA0J	8	850	4.1	10	6	5	50	22	400	45	105	200
C44AMFP5100ZD0J	10	850	3.2	10	6	5	50	25	500	50	101	200
C44AMGP5150ZA0J	15	850	2.0	10	7	8	50	25	750	60	101	240
C44AMGP5200ZA0J	20	850	2.6	10	7	6	50	25	1000	65	101	310
C44AMGP5220ZA0J	22	850	1.5	12	5	4	40	25	880	55	138	300
C44AMGP5250ZA0J	25	850	3.2	15	7	5	40	25	1000	55	138	300
C44AMGP5300ZA0J	30	850	3.2	15	8	5	40	32	1200	65	138	380
C44AMGP5330ZA0J	33	850	3.2	15	8	5	40	32	1320	65	138	360
C44AMGP5350ZA0J	35	850	3.2	15	10	5	40	32	1400	65	138	360
C44AMGP5400ZB0J	40	850	3.2	15	10	5	40	32	1600	76	138	580
C44AMGP5500ZA0J	50	850	3.2	20	10	5	40	32	2000	76	138	625
C44AMGR5600ZA0J	60	850	3.2	20	10	5	40	32	2400	85	137	770

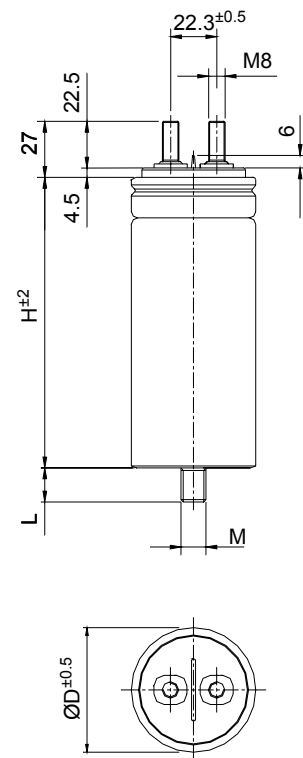
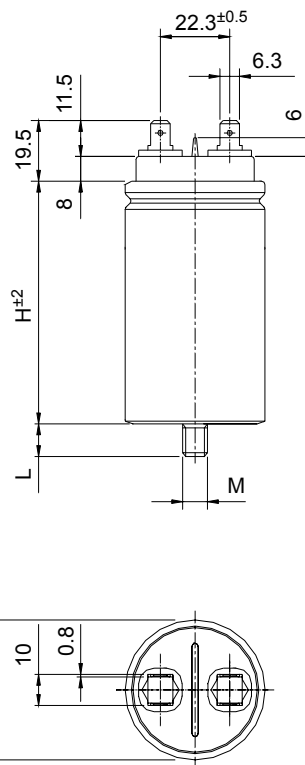
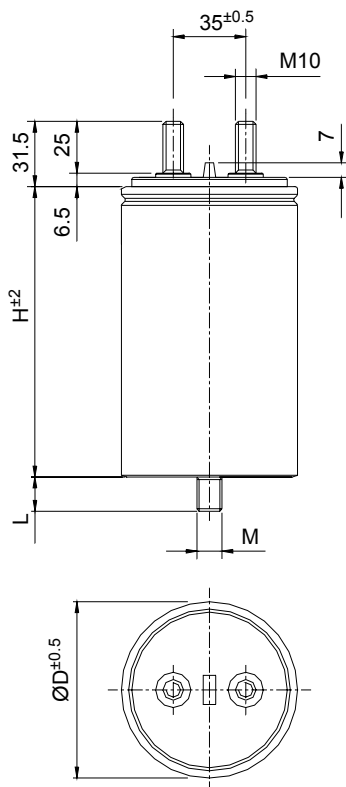
DRAWINGS

MECHANICAL CHARACTERISTICS

Case	Brass screw terminals			Bolt		
D	Driving Torque Nm	Creepage Distance	Clearance In air	M	H	Driving Torque Nm
45	4	14	10	M 8	10	6
50	4	14	10	M 8	10	6
55	4	16	10	M 12	12.5	10
60	4	18	10	M 12	12.5	10
65	4	20	10	M 12	12.5	10
70	4	22	10	M 12	12.5	10
85	7	22	10	M 12	12.5	10



TERMINATIONS



Statements of suitability for certain applications are based on our knowledge of typical operating conditions for such applications, but are not intended to constitute – and we specifically disclaim – any warranty concerning suitability for a specific customer application or use. This Information is intended for use only by customers who have the requisite experience and capability to determine the correct products for their application. Any technical advice inferred from this Information or otherwise provided by us with reference to the use of our products is given gratis, and we assume no obligation or liability for the advice given or results obtained.

Snubber MKP Capacitors for Pulse Applications with Double-Sided Metallized Electrodes, Schoopage Contacts and Internal Series Connection

Special Features

- Pulse duty construction
- Self-healing
- Particularly reliable contact-configurations: 4-pin versions and screwable plate connections
- Internal series connection from 400 VAC
- Very low dissipation factor
- Negative capacitance change versus temperature
- According to RoHS 2011/65/EC

Typical Applications

For high pulse and high frequency applications requiring extremely reliable contacts e.g.

- IGBT-applications

Construction

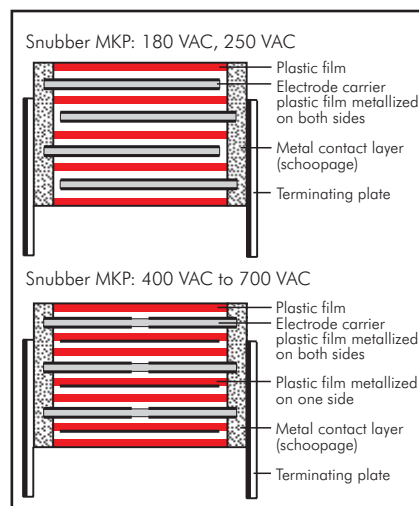
Dielectric:

Polypropylene (PP) film

Capacitor electrodes:

Double-sided metallized plastic film

Internal construction:



Encapsulation:

Solvent-resistant, flame-retardant plastic case with epoxy resin seal, UL 94 V-0

Terminations:

Tinned wire or plates.

Marking:

Colour: Red. Marking: Black.
Epoxy resin seal: Red

Electrical Data

Capacitance range: 0.047 μ F to 25 μ F

Rated voltages:

250 VDC, 400 VDC, 630 VDC, 1000 VDC, 1600 VDC, 2000 VDC, 3000 VDC

Capacitance tolerances:

$\pm 20\%$, $\pm 10\%$, $\pm 5\%$ (other tolerances are available subject to special enquiry)

Operating temperature range:

-55°C to $+100^{\circ}\text{C}$

Insulation resistance at $+20^{\circ}\text{C}$:

$C \leq 0.33 \mu\text{F}$: $\geq 1 \times 10^5 \text{ M}\Omega$

(mean value: $5 \times 10^5 \text{ M}\Omega$)

$C > 0.33 \mu\text{F}$: $\geq 30000 \text{ sec (M}\Omega \times \mu\text{F)}$

(mean value: 100 000 sec)

Measuring voltage: 100 V/1 min.

Test voltage: 2 sec

L	$\leq 2000 \text{ VDC}$	3000 VDC
< 41.5	$1.6 U_r$	$1.2 U_r$
41.5	$1.4 U_r$	$1.2 U_r$
56	$1.2 U_r$	$1.2 U_r$

Dissipation factors at $+20^{\circ}\text{C}$: $\tan \delta$

at f	$C \leq 0.1 \mu\text{F}$	$0.1 \mu\text{F} < C \leq 1.0 \mu\text{F}$	$C > 1.0 \mu\text{F}$
1 kHz	$\leq 3 \times 10^{-4}$	$\leq 3 \times 10^{-4}$	$\leq 3 \times 10^{-4}$
10 kHz	$\leq 4 \times 10^{-4}$	$\leq 6 \times 10^{-4}$	–
100 kHz	$\leq 15 \times 10^{-4}$	–	–

Maximum pulse rise time:

Capacitance μF	max. pulse rise time V/ μsec at $T_A < 40^{\circ}\text{C}$						
	250 VDC	400 VDC	630 VDC	1000 VDC	1600 VDC	2000 VDC	3000 VDC
0.047 ... 0.22	500	500	900	1400	1400	1400	1400
0.33 ... 0.68	300	400	700	900	900	900	900
1.0 ... 2.2	200	200	400	400	500	500	500
2.5 ... 6.8	80	100	150	300	400	–	–
7.0 ... 10	50	70	75	–	–	–	–
15 ... 25	35	50	–	–	–	–	–

for pulses equal to the rated voltage

Mounting Recommendation

Excessive mechanical strain, e.g. pressure or shock onto the capacitor body, is to be avoided during mounting and usage of the capacitors. When fixing the plates the screw torque is to be limited to max. 5 Nm.

For further details and graphs please refer to Technical Information.

Climatic test category:

55/100/56 in accordance with IEC

Voltage derating:

A voltage derating factor of 1.35 % per K must be applied from $+85^{\circ}\text{C}$ for DC voltages and from $+75^{\circ}\text{C}$ for AC voltages

Reliability:

Operational life $> 300\,000$ hours

Failure rate $< 1 \text{ fit } (0.5 \times U_r \text{ and } 40^{\circ}\text{C})$

Specific dissipation:

Box size* WxHxL in mm	Specific dissipation in Watts per K above the ambient temperature
19x31x56	0.068
23x34x56	0.079
27x37.5x56	0.092
33x48x56	0.122
37x54x56	0.142

* other box sizes see page 10.

Packing

Packing units at the end of the catalogue.

Packing quantities may vary depending on the plate version.

Continuation

General Data

Capacitance	2000 VDC/700 VAC*				3000 VDC/700 VAC*			
	W	H	L	Part number	W	H	L	Part number
0.047 μF	10.5	19	26.5	SNMPU024705G_____	11	21	31.5	SNMPW024706B_____
0.068 "	11	21	26.5	SNMPU026805I_____	13	24	31.5	SNMPW026806D_____
					11	22	41.5	SNMPW026807B_____
0.1 μF	13	24	31.5	SNMPU031006D_____	15	26	31.5	SNMPW031006F_____
	11	22	41.5	SNMPU031007B_____	13	24	41.5	SNMPW031007C_____
0.15 "	15	26	31.5	SNMPU031506F_____	15	26	41.5	SNMPW031507D_____
	13	24	41.5	SNMPU031507C_____				
0.22 "	17	34.5	31.5	SNMPU032206I_____	19	32	41.5	SNMPW032207F_____
	15	26	41.5	SNMPU032207D_____				
0.33 "	19	32	41.5	SNMPU033307F_____	24	45.5	41.5	SNMPW033307H_____
					19	31	56	SNMPW033308D_____
0.47 "	20	39.5	41.5	SNMPU034707G_____	31	46	41.5	SNMPW034707I_____
					27	37.5	56	SNMPW034708H_____
0.68 "	24	45.5	41.5	SNMPU036807H_____	35	50	41.5	SNMPW036807J_____
					33	48	56	SNMPW036808J_____
1.0 μF	35	50	41.5	SNMPU041007J_____	40	55	41.5	SNMPW041007K_____
	33	48	56	SNMPU041008J_____	33	48	56	SNMPW041008J_____
1.5 "	40	55	41.5	SNMPU041507K_____	37	54	56	SNMPW041508L_____
	33	48	56	SNMPU041508J_____				
2.0 "	37	54	56	SNMPU042008L_____				

* AC voltage: $f \leq 1000 \text{ Hz}$; $1.4 \times U_{\text{rms}} + U_{\text{DC}} \leq U_{\text{r}}$

New box sizes

Dims. in mm.

Ionisation inception level in isolated cases may be lower than admissible rated AC voltage.

Versions and dimensional drawings see page 93.

Rights reserved to amend design data without prior notification.

Part number completion:

Version codes see page 96.

Tolerance: 20 % = M

10 % = K

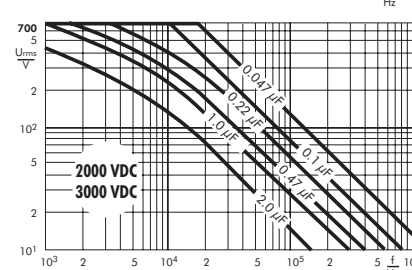
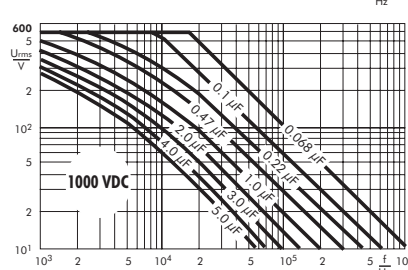
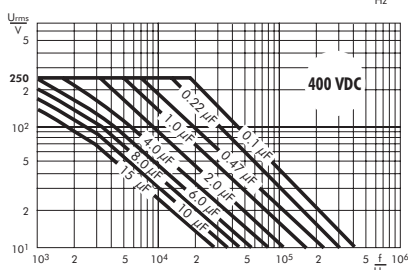
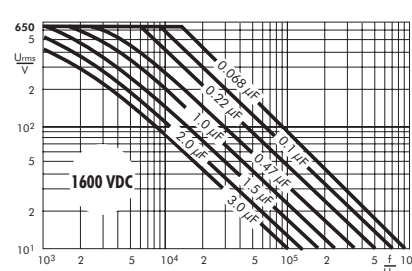
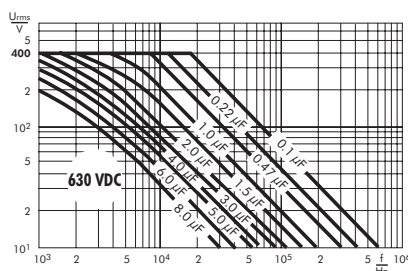
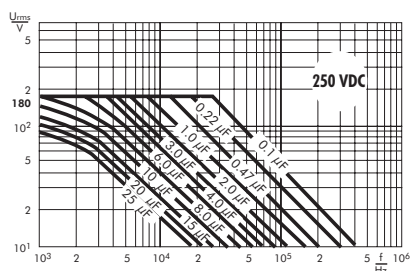
5 % = J

Packing: bulk = S

Pin length: 6-2 = SD

none = 00 (for plate versions)

Permissible AC voltage in relation to frequency at 10° C internal temperature rise (general guide).



Ringraziamenti

Alla mia famiglia e i miei amici, per avermi sopportato e aiutato più di quanto loro non sappiano.

A Giulia, che più di tutti mi ha confortato e spinto a ricominciare.

A me stesso, perché non ho mai smesso di crederci.

Enrico