

**ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA**

---

**SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA**

*Dipartimento di Ingegneria dell'Energia Elettrica e  
dell'Informazione*

**Corso di Laurea in Ingegneria Elettrica**

**TESI DI LAUREA**

in

**SENSORI E TRASDUTTORI PER L'INDUSTRIA E PER L'AMBIENTE**

**INTERRUTTORI DIFFERENZIALI: ANALISI  
DEL FUNZIONAMENTO ED ASPETTI NORMATIVI**

CANDIDATO

**Simone Dall'Olio**

RELATORE:

Chiar.mo Prof. **Gaetano Pasini**

Anno Accademico 2015/2016

Sessione III



# INDICE

➤ <b>OBIETTIVI E STRUTTURA DELL'ELABORATO</b> .....	1
➤ <b>CAPITOLO 1 CARATTERISTICHE DELL'INTERRUTTORE DIFFERENZIALE</b> .....	3
• <b>1.1 GENERALITÀ</b> .....	3
▪ <b>1.1.1 Protezione dai contatti diretti</b> .....	3
▪ <b>1.1.2 Protezione dai contatti indiretti</b> .....	6
▪ <b>1.1.3 Protezione antincendio</b> .....	7
• <b>1.2 PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO DELL'INTERRUTTORE DIFFERENZIALE</b> .....	8
• <b>1.3 CARATTERISTICHE DELL'INTERRUTTORE DIFFERENZIALE</b> .....	11
• <b>1.4 CLASSIFICAZIONE</b> .....	12
▪ <b>1.4.1 Classificazione secondo il comportamento in presenza di correnti pulsanti unidirezionali</b> .....	13
○ <b>1.4.1.1 Interruttore differenziale del tipo AC</b> .....	13
○ <b>1.4.1.2 Interruttore differenziale del tipo A</b> .....	14
○ <b>1.4.1.3 Interruttore differenziale del tipo F</b> .....	15
○ <b>1.4.1.4 Interruttore differenziale del tipo B</b> .....	16
▪ <b>1.4.2 Classificazione secondo il ritardo di intervento</b> .....	19
➤ <b>CAPITOLO 2 PROBLEMATICHE DOVUTE ALLA NON IDEALITÀ DELL'INTERRUTTORE DIFFERENZIALE</b> .....	23
• <b>2.1 INTRODUZIONE</b> .....	23
• <b>2.2 LEGAME TRA CORRENTE D'INTERVENTO E FREQUENZA</b> ....	25
• <b>2.3 COMPORTAMENTO DEGLI INTERRUTTORI DIFFERENZIALI ALLE ALTE FREQUENZE</b> .....	38

• <b>2.4 IMPATTO DELLE ARMONICHE SUL COMPORTAMENTO DEGLI INTERRUITORI DIFFERENZIALI</b> .....	35
▪ 2.4.1 <i>Impatto della 3<sup>a</sup> armonica</i> .....	37
▪ 2.4.2 <i>Impatto della 23<sup>a</sup> e 49<sup>a</sup> armonica</i> .....	39
▪ 2.4.3 <i>Test di laboratorio</i> .....	40
▪ 2.4.4 <i>Impatto di diverse armoniche</i> .....	42
• <b>2.5 IMPATTO DELLA VELOCITÀ DEL MOTORE E DELLA FREQUENZA DI MODULAZIONE PWM</b> .....	44
• <b>2.6 EFFETTI DELLA SATURAZIONE, MAGNETIZZAZIONE E PERDITE NEL NUCLEO</b> .....	49
▪ 2.6.1 <i>Effetti della saturazione del nucleo</i> .....	50
▪ 2.6.2 <i>Effetti della magnetizzazione e delle perdite nel nucleo</i> .....	51
• <b>2.7 SCATTI INTEMPESTIVI DOVUTI A SOVRATENSIONI</b> .....	55
• <b>2.8 SOLUZIONI AGLI SCATTI INTEMPESTIVI E PROPOSTE DEI COSTRUTTORI</b> .....	59
▪ 2.8.1 <i>Dispositivo differenziale tipo APR della ABB</i> .....	61
▪ 2.8.2 <i>Dispositivo differenziale tipo G e K della Siemens</i> .....	63
▪ 2.8.3 <i>Dispositivo differenziale tipo SI della Schneider Electric</i> .....	64
➤ <b>CAPITOLO 3 ASPETTI NORMATIVI</b> .....	67
• <b>3.1 VERIFICHE DEL CORRETTO FUNZIONAMENTO PREVISTE DALLE NORME</b> .....	67
• <b>3.2 VERIFICA DELLA CARATTERISTICA DI INTERVENTO</b> .....	68
▪ 3.2.1 <i>Prove per la verifica della caratteristica di intervento previste dalla Norma CEI EN 61008-1</i> .....	68
▪ 3.2.2 <i>Prove aggiuntive introdotte dalla Norma CEI EN 61009-1</i> .....	74
▪ 3.2.3 <i>Prove aggiuntive introdotte dalla Norma CEI EN 62423</i> .....	76
➤ <b>CONCLUSIONI</b> .....	85
➤ <b>BIBLIOGRAFIA</b> .....	89

# ***OBIETTIVI E STRUTTURA DELL'ELABORATO***

Finalità dell'elaborato è fornire una panoramica esaustiva sullo stato dell'arte degli interruttori automatici differenziali richiamando, ove possibile, le indicazioni fornite dalle norme relative alla sicurezza negli impianti elettrici, agli effetti della corrente elettrica sul corpo e agli interruttori differenziali stessi.

In un primo momento sono perciò presentati campi di utilizzo, caratteristiche e principio di funzionamento dei dispositivi differenziali, distinguendo i criteri con cui se ne effettuano le classificazioni e descrivendo le proprietà di ogni tipologia.

L'elaborato si concentra poi sui malfunzionamenti degli interruttori differenziali: tramite la presentazione di numerosi studi condotti in laboratorio atti allo studio del comportamento degli interruttori differenziali in condizioni non ideali, si illustrano le cause che possono comportarne un errato funzionamento, evidenziando la complessità dell'analisi degli interventi intempestivi di tali dispositivi. Nello specifico, lo studio è concentrato sul rapporto tra corrente d'intervento e frequenza, analizzando l'influenza delle componenti armoniche di vario ordine rilevando la differenza nei comportamenti degli interruttori differenziali di diverso tipo e di diversi costruttori. Nello svolgimento degli studi che vengono presentati, al fine di semplificarne la messa in atto, sono stati trascurati gli effetti della saturazione, della magnetizzazione e delle perdite nel nucleo, i quali vengono illustrati a parte. In un secondo momento vengono affrontati gli interventi intempestivi causati dalla presenza di sovratensioni, dovute ad una fulminazione su una parte dell'impianto o a manovre nella rete, richiamando anche le norme ed illustrando le prove che esse prevedono al fine di verificare il corretto funzionamento dei dispositivi in tali condizioni. Sono infine presentati alcuni tipi di interruttori automatici differenziali di diversi costruttori sviluppati apposta per garantire un corretto funzionamento evitando che si verificano interventi indesiderati.

La parte finale della tesi è dedicata alle indicazioni fornite dalle norme riguardanti gli interruttori differenziali, nello specifico alle prove di corretto funzionamento a cui devono essere sottoposti i dispositivi differenziali per verificare che le caratteristiche di intervento siano conformi ai parametri dettati dalle norme stesse. Vengono illustrate le prove inizialmente previste, poi

integrate in un secondo tempo dall'introduzione di aggiornamenti e nuove norme, che prevedono ulteriori prove per interruttori differenziali di diversa tipologia.

# CAPITOLO 1

## *CARATTERISTICHE*

### *DELL'INTERRUTTORE DIFFERENZIALE*

#### **1.1 GENERALITÀ**

L'interruttore automatico differenziale è un dispositivo ampiamente diffuso nel campo della sicurezza elettrica, in quanto capace di rilevare eventuali correnti anomale verso terra – provocate ad esempio da un guasto – ed interrompere quindi l'alimentazione del sistema su cui è installato.

Come recita la Norma CEI EN 61008-1, tali dispositivi sono destinati a proteggere le persone contro i contatti indiretti (purché le masse dell'installazione siano collegate ad un adeguato elettrodo di terra), e possono essere utilizzati per fornire una protezione contro i pericoli d'incendio dovuti ad una corrente di guasto verso terra che persista senza provocare il funzionamento del dispositivo di protezione da sovracorrente. Per quanto riguarda invece la protezione da contatti diretti, la Norma CEI 64-8 non riconosce gli interruttori differenziali come misura di protezione completa: infatti l'uso di interruttori differenziali con corrente differenziale di intervento non superiore a 30 mA, pur permettendo di eliminare gran parte dei rischi dovuti ai contatti diretti, non permette di evitare gli infortuni provocati dal contatto simultaneo con due parti attive del circuito protetto che si trovino a potenziali differenti. Ne consegue che gli interruttori differenziali con corrente differenziale nominale d'intervento non superiore a 30 mA sono riconosciuti come protezione addizionale contro i contatti diretti in caso di insuccesso delle altre misure di protezione o di incuria da parte degli utilizzatori.

##### **1.1.1 PROTEZIONE DA CONTATTI DIRETTI ( $I_{\Delta n} \leq 30 \text{ mA}$ )**

Si parla di contatto diretto quando una persona viene a contatto con una parte attiva del sistema elettrico in tensione durante il normale funzionamento (fenomeno dell'elettrocuzione). In

questa situazione la persona diventa parte del circuito elettrico per mezzo della resistenza del proprio corpo e della resistenza di terra: tali resistenze determinano l'intensità della corrente che fluisce attraverso il corpo, la quale può essere altamente pericolosa e provocare gravi conseguenze.

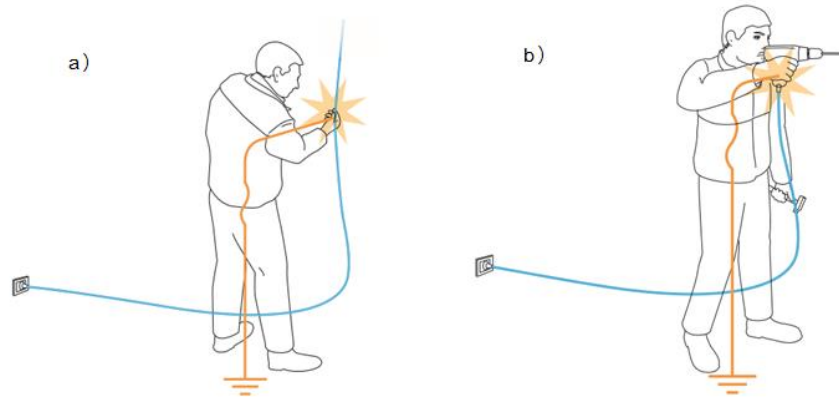


Fig. 1: Esempi di contatto diretto (a) e contatto indiretto (b)

Gli effetti che può comportare il passaggio di una corrente attraverso il corpo di un essere umano sono i seguenti:

- Tetanizzazione: i muscoli interessati al passaggio della corrente si contraggono, rendendo difficoltoso staccarsi dalla parte in tensione. Tale effetto è raro quando il corpo viene attraversato da correnti molto elevate, in quanto l'eccitazione muscolare è elevata al punto che i movimenti muscolari involontari proiettano il soggetto lontano dalla sorgente;
- Arresto respiratorio: se la corrente elettrica attraversa i muscoli che controllano il movimento dell'apparato respiratorio, la contrazione involontaria di questi muscoli altera il normale funzionamento del sistema respiratorio e il soggetto può morire soffocato o subire le conseguenze di traumi dovuti all'asfissia;
- Fibrillazione ventricolare: è dovuta alla sovrapposizione delle correnti provenienti dall'esterno con quelle fisiologiche che, generando delle contrazioni scoordinate, fa perdere il giusto ritmo al cuore. È particolarmente pericolosa poiché persiste anche se lo stimolo è cessato, diventando quindi un fenomeno non reversibile;
- Ustioni: sono prodotte dal calore che si sviluppa per effetto Joule dalla corrente elettrica che fluisce attraverso il corpo.

È evidente che la gravità degli effetti del passaggio della corrente attraverso il corpo dipendono principalmente dall'intensità della corrente stessa. La Norma IEC 60479-1 fornisce



indicazioni riguardo la corrente che attraversa il corpo umano, fornendo una curva di sicurezza corrente-tempo che identifica graficamente quattro zone con le quali vengono distinti gli effetti fisiologici in relazione all'entità della corrente alternata (15 – 100 Hz) che attraversa il corpo umano.

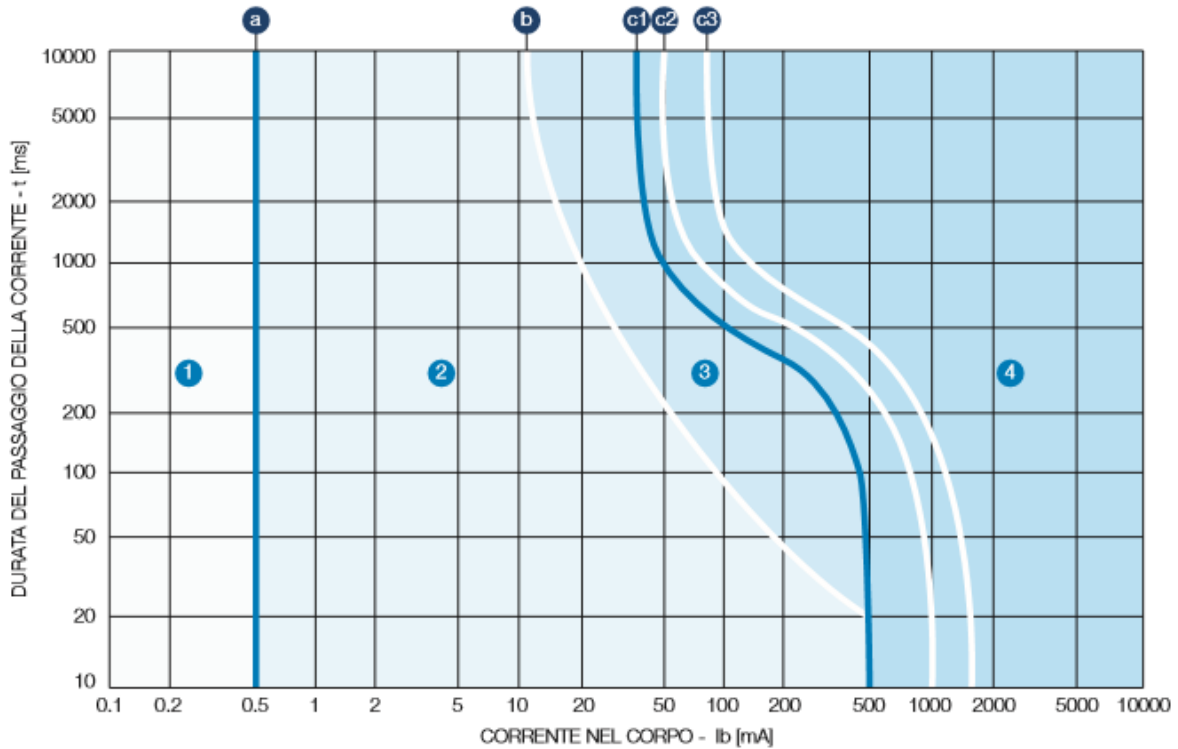


Fig. 2: Curva di sicurezza corrente-tempo

Zona	Effetti
1	Abitualmente nessuna reazione
2	Abitualmente nessun effetto fisiologicamente pericoloso
3	Abitualmente nessun danno organico. Probabilità di contrazioni muscolari e difficoltà respiratoria; disturbi reversibili nella formazione e conduzione di impulsi nel cuore, inclusi fibrillazione atriale e arresto cardiaco provvisorio senza fibrillazione ventricolare, che aumentano con l'intensità della corrente e il tempo
4	In aggiunta agli effetti della Zona 3, la probabilità di fibrillazione ventricolare aumenta fino a circa il 5% (curva c2), al 50% (curva c3), oltre al 50% al di là della curva c3. Effetti patofisiologici come arresto cardiaco, arresto respiratorio, gravi ustioni possono presentarsi con l'aumentare dell'intensità della corrente e del tempo

Tab. 1: Effetti della corrente alternata sul corpo umano

Poiché l'intensità della corrente dipende dalla resistenza del corpo attraversato, e tale resistenza varia di soggetto in soggetto oltre a dipendere dalle condizioni in cui il medesimo soggetto si può trovare al momento del contatto e dal percorso che la corrente copre, non è possibile creare un parametro di riferimento comune che risulti del tutto attendibile. Dunque per tracciare le curve di sicurezza di Fig. 2, la Norma IEC 60479-1 stabilisce una resistenza del corpo pari a  $1000 \Omega$  (ricavata sperimentalmente considerando il percorso mano-mano o mano-piede) e una tensione di impianto di 230 V. Per il punto di passaggio si considera una resistenza tendente allo zero, in modo da considerare il caso peggiore.

Osservando le curve di Fig. 2 si può notare che una corrente di 30 mA può provocare danni gravi alla persona il cui corpo è attraversato da tale corrente, a meno che quest'ultima non venga interrotta in un tempo relativamente breve. Questo spiega perché in precedenza, parlando dei contatti diretti, si è sempre fatto riferimento ad interruttori differenziali con corrente d'intervento non superiore a 30 mA.

La Norma CEI 64-8 stabilisce che la presenza di interruttori differenziali di tali caratteristiche nominali è richiesta:

- a) nei locali ad uso abitativo per i circuiti che alimentano le prese a spina con corrente nominale non superiore a 20 A;
- b) per i circuiti che alimentano le prese a spina con corrente nominale non superiore a 32 A destinate ad alimentare apparecchi utilizzatori mobili usati all'esterno.

### **1.1.2 PROTEZIONE DA CONTATTI INDIRETTI**

Si parla di contatto indiretto quando una persona entra in contatto con una massa in tensione in seguito a un guasto dovuto a mancanza di una appropriata manutenzione o al deterioramento dell'isolamento (Fig. 1b). In questa evenienza, all'interno del corpo soggetto fluisce una corrente dovuta alla tensione di contatto.

Come specifica la CEI 64-8, non è richiesta l'interruzione dell'alimentazione se sulle masse non viene superato il valore della tensione di contatto limite convenzionale  $U_L$  (50 V in c.a. e 120 V in c.c. non ondulata), ossia il valore massimo a vuoto che convenzionalmente si ritiene possa permanere per un tempo indefinito nelle condizioni ambientali specificate e alla tensione nominale di alimentazione, senza pericolo per le persone. Tuttavia l'esperienza ha dimostrato che,

in fase di progettazione dell'impianto, una stima accurata della tensione di contatto comporta difficoltà talvolta insormontabili, essendo basata su alcuni parametri il cui valore dipende dalla configurazione dell'impianto stesso; si è riscontrato che anche la verifica del suo valore ad impianto completato presenta notevoli complicazioni. Per questo motivo il metodo maggiormente usato è quello dell'interruzione automatica dell'alimentazione, e a tale scopo vengono utilizzati gli interruttori differenziali: il dispositivo di protezione deve interrompere automaticamente l'alimentazione al circuito o al componente elettrico che lo stesso dispositivo protegge, in modo che tra una parte attiva e una massa o un conduttore di protezione non possa persistere, per una durata sufficiente a causare un rischio di effetti fisiologici dannosi in una persona in contatto con parti simultaneamente accessibili, una tensione di contatto presunta superiore alla tensione di contatto limite convenzionale.

Affinché si possa realizzare una protezione attiva contro i contatti indiretti è necessario che tutte le masse estranee e tutti gli elementi conduttori accessibili siano collegati all'impianto di terra tramite un conduttore di protezione.

### **1.1.3 PROTEZIONE ANTINCENDIO**

Gli impianti elettrici e gli apparecchi ad esso collegati possono essere soggetti a piccole fughe di corrente verso terra, dovute per esempio ad un cedimento dell'isolamento, che possono precedere corto circuiti, prima che siano rilevabili dall'interruttore magnetotermico o dal fusibile, che svolgono la funzione di protezione dalle sovracorrenti. Va comunque detto che in molti casi tali dispersioni verso terra non evolvono verso corto circuiti veri e propri, ma si mantengono a lungo su valori relativamente contenuti ( $70 \div 500$  mA) non rilevati dalla protezione da sovracorrenti in quanto non li distingue da normali correnti di linea, ma sufficienti per innescare incendi se viene interessato un piccolo volume di materiale combustibile.

Per questo motivo, la Norma IEC 60364-4-482 richiede misure di prevenzione di incendi che possono nascere da guasti nell'isolamento, utilizzando interruttori differenziali con corrente d'intervento nominale  $I_{\Delta n} \leq 300$  mA come protezione di cavi e conduttori nei sistemi TN e TT. In applicazioni in cui eventuali guasti di tipo termico possono provocare incendi (ad esempio alcuni sistemi di riscaldamento) si devono usare dispositivi differenziali con corrente d'intervento nominale  $I_{\Delta n} = 30$  mA.

## 1.2 PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO DELL'INTERRUTTORE DIFFERENZIALE

Prima di illustrare le grandezze caratteristiche che contraddistinguono gli interruttori automatici differenziali e i numerosi metodi di classificazione, che consentono di distinguere diversi tipi di interruttori, è bene illustrarne il principio di funzionamento per mezzo di uno schema semplificato, in cui si considera un differenziale monofase ideale.

L'interruttore differenziale basa il proprio funzionamento sul principio di Kirchhoff: verifica infatti che la somma delle correnti entranti e uscenti dal sistema elettrico su cui è applicato sia nulla, condizione che si ha durante il normale funzionamento. Quando si presenta una condizione di guasto nel sistema elettrico si crea una corrente verso terra determinata da un difetto dell'isolamento, e dunque viene meno la condizione di uguaglianza tra le correnti di entrata e uscita del sistema stesso. Il dispositivo differenziale rileva lo squilibrio delle due correnti, e quindi interviene per evitare che tale situazione possa arrecare rischi a persone o al sistema stesso in caso di incendio. Tale squilibrio di correnti determina la corrente differenziale  $I_{\Delta}$ , che la Norma CEI EN 61008-1 definisce come “*somma vettoriale dei valori istantanei della corrente che fluisce nel circuito principale dell'interruttore differenziale (espressa in valore efficace)*”. E' qui riportato lo schema di principio di un interruttore differenziale monofase:

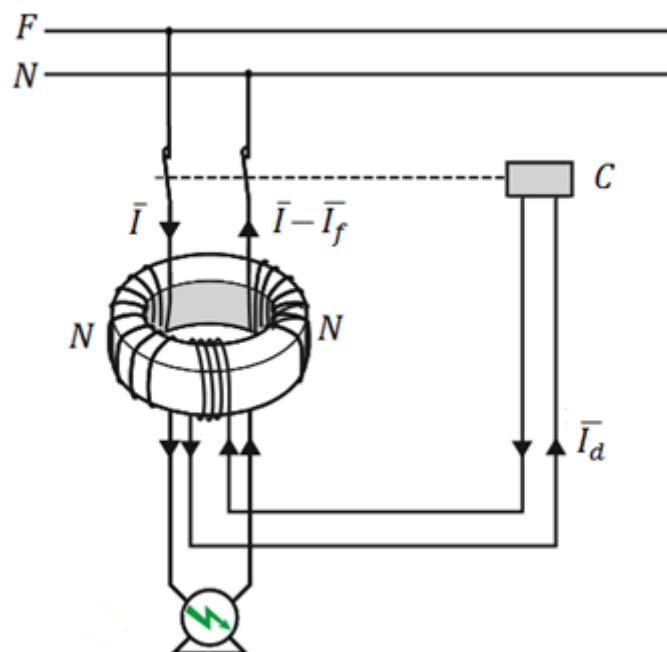


Fig. 3: Schema di principio di un interruttore differenziale monofase

Il dispositivo differenziale, posizionato tra la sorgente di alimentazione e l'utilizzatore collegato a terra, è composto da un trasformatore a nucleo toroidale di materiale ferromagnetico attraversato dai conduttori di alimentazione, che costituiscono il circuito primario del trasformatore (in figura rappresentati dai due avvolgimenti a uguale numero di spire  $N$ ). Nel conduttore connesso alla fase della linea circola la corrente di ingresso del sistema utilizzatore, mentre nel conduttore connesso al neutro circola la corrente di uscita: in condizioni di funzionamento normale, in cui cioè le due correnti sono uguali e opposte, i flussi da loro generati si annullano reciprocamente. Nel caso di guasto, a causa della creazione di una corrente verso terra  $I_f$ , si ha una corrente di ritorno dal sistema utilizzatore inferiore rispetto a quella di andata, e dunque si produce un flusso di squilibrio che induce una tensione nel terzo avvolgimento con diverso numero di spire, il quale costituisce l'avvolgimento secondario del trasformatore. Questo avvolgimento è collegato all'organo di controllo indicato con C, quest'ultimo riceve dall'avvolgimento secondario del trasformatore un segnale che lo porta ad aprire i contatti di alimentazione dell'impianto. Tale organo di controllo è infatti un attuatore elettromeccanico, come illustrato nella seguente figura:

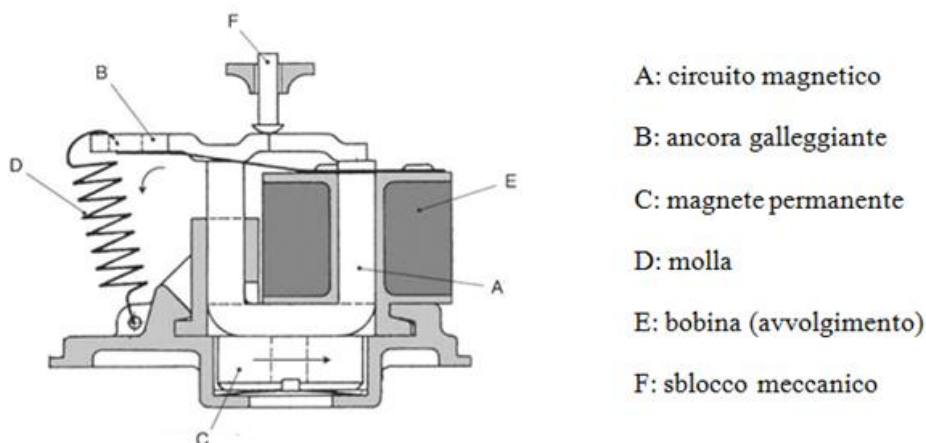


Fig. 4: Attuatore elettromeccanico per interruttore automatico differenziale

In condizioni di funzionamento normale l'ancora galleggiante resta attaccata al circuito magnetico, in quanto la forza meccanica di attrazione esercitata dalla molla equivale alla forza magnetica di attrazione esercitata dal flusso del magnete permanente. In condizioni di guasto la bobina è energizzata, e quindi al flusso continuo esercitato dal magnete si somma un flusso alternato prodotto dalla bobina. Durante una semionda i due flussi avranno segno opposto, ciò comporta una riduzione del flusso totale e una conseguente riduzione della forza magnetica di attrazione esercitata sull'ancora: la forza meccanica esercitata dalla molla diventa perciò superiore a quella magnetica dovuta al flusso, e di conseguenza l'ancora muove l'organo di rilascio facendo scattare

l'interruttore e aprendo i contatti di alimentazione dell'impianto.

E' bene specificare che il principio di funzionamento presentato fa riferimento a dispositivi ideali. Se si considera infatti un sistema reale, non si avrà mai una corrente differenziale nulla a causa della presenza delle correnti di dispersione verso terra: come specifica la Norma CEI 64-8, la corrente di dispersione verso terra è una corrente che fluisce verso terra, o verso le masse, in assenza di guasto. È dunque una corrente che si ha in condizioni di normale funzionamento, e di cui bisogna tenere conto in quanto comporta la presenza di una corrente differenziale non nulla nonostante non vi sia verificato alcun guasto. La presenza delle correnti di dispersione è dovuta alla non idealità dei dielettrici e alle capacità parassite dei componenti dell'impianto, quali ad esempio capacità distribuite verso i collegamenti di terra, capacità nelle bobine dei trasformatori e dei motori elettrici, capacità nei filtri. Gli isolanti presentano una resistenza il cui valore dipende dalle caratteristiche e dallo stato del dielettrico. Al fine di quantificare il valore della corrente di dispersione, la Norma CEI 64-8 indica come eseguire la misura di tale resistenza e quali valori minimi deve rispettare: nella specifico la resistenza di isolamento deve essere misurata, applicando una tensione continua di 500 V, tra ogni conduttore attivo e il conduttore di protezione connesso a terra; deve avere un valore maggiore o uguale a quello indicato dalla norma relativamente alla tensione nominale dell'impianto ( $\geq 1 \text{ M}\Omega$  per un sistemi con tensione nominale pari o superiori a 500 V). Il valore della resistenza di isolamento va verificato tramite misura periodicamente.

Le correnti di dispersione possono essere suddivise in due tipi:

- correnti statiche di dispersione, scorrono costantemente verso terra e occupano una quota elevata delle correnti di dispersione che scorrono tra le capacità;
- correnti dinamiche di dispersione, scorrono verso terra per intervalli molto brevi (per pochi  $\mu\text{s}$  fino ad un massimo di qualche ms) all'inserzione di dispositivi con circuiti di filtraggio.

Le correnti di dispersione possono assumere intensità di diversi Ampere, rischiando quindi di causare l'intervento dell'interruttore differenziale.

Il principio di funzionamento è comune a tutti i tipi di interruttori differenziali costruiti dai diversi costruttori; l'unica eccezione è rappresentata dal differenziale di tipo B. Questo infatti presenta un secondo toroide in serie a quello visto, che si occupa di rilevare eventuali correnti

differenziali di tipo continuo. Questo aspetto sarà visto in maniera più approfondita in un secondo momento.

### 1.3 CARATTERISTICHE DELL'INTERRUTTORE DIFFERENZIALE

Due delle principali norme da consultare nello studio dei dispositivi automatici differenziali sono le Norme CEI EN 61009-1 e CEI EN 61008-1, che trattano le prescrizioni generali degli interruttori differenziali rispettivamente con e senza sganciatori di sovracorrente incorporati per installazioni domestiche e simili. Al punto 5. di entrambe le norme è possibile consultare le grandezze caratteristiche di un interruttore differenziale che il costruttore deve assegnare:

- Corrente nominale  $I_n$ : valore efficace di corrente che l'interruttore può portare in servizio ininterrotto;
- Corrente differenziale d'intervento nominale  $I_{\Delta n}$ : valore efficace di corrente differenziale per il quale l'interruttore deve intervenire;
- Corrente differenziale di non intervento nominale  $I_{\Delta n0}$ : valore efficace di corrente differenziale per il quale l'interruttore non interviene (il valore normale di tale corrente corrisponde a  $0,5 I_{\Delta n}$ : ciò significa che l'interruttore deve poter garantire il non funzionamento fino a correnti differenziali pari al 50% del valore nominale, lasciando perciò “scoperto” l'intervallo  $[0,5 I_{\Delta n} ; I_{\Delta n}]$ , all'interno del quale l'interruttore può intervenire);
- Tensione nominale  $U_n$ : valore efficace di tensione alla quale sono riferite le prestazioni;
- Frequenza nominale: frequenza di esercizio per la quale l'interruttore differenziale è previsto e alla quale si riferiscono le altre grandezze;
- Potere di chiusura e d'interruzione nominale  $I_m$ : valore efficace della componente alternata della corrente presunta (“corrente che passerebbe nel circuito se ogni polo principale dell'interruttore differenziale e del dispositivo di protezione da sovracorrente (se esiste), fosse sostituito da un conduttore di impedenza trascurabile”) che l'interruttore può stabilire, portare e interrompere;
- Potere di chiusura e d'interruzione differenziale nominale  $I_{\Delta m}$ : valore efficace della

componente alternata della corrente presunta differenziale che l'interruttore differenziale può stabilire, portare e interrompere;

- Corrente di cortocircuito condizionata nominale  $I_{nc}$ : valore efficace di corrente presunta che l'interruttore differenziale, protetto da SCPD (Short Circuit Protective Device, dispositivo di protezione da corto circuito), può sopportare senza subire alterazioni che ne compromettano la funzionalità;
- Corrente di cortocircuito differenziale condizionata nominale  $I_{\Delta c}$ : valore di corrente differenziale presunta che l'interruttore differenziale, protetto da SCPD, può sopportare senza subire alterazioni che ne compromettano la funzionalità;
- Metodo di installazione;
- Metodo di connessione;
- Numero di poli;
- Gamme di temperatura dell'aria ambiente (le gamme normali di temperatura dell'aria ambiente sono da  $-5^{\circ}\text{C}$  a  $+40^{\circ}\text{C}$  e da  $-25^{\circ}\text{C}$  a  $+40^{\circ}\text{C}$ );
- Grado di protezione: definito in base alla Norma IEC 60529, che fornisce indicazioni riguardo la protezione degli involucri per materiale elettrico contro penetrazione di corpi solidi estranei (tra cui la polvere) e contro penetrazione di acqua;
- Comportamento dell'interruttore differenziale in caso di difetto nella tensione di rete, nel caso in cui le funzioni di rivelazione, valutazione o interruzione dell'interruttore differenziale dipendano dalla tensione di rete;
- Tempo di ritardo, se applicabile: nel caso di interruttore differenziale tipo S, in cui si può stabilire un ritardo intenzionale;
- Comportamento in presenza di correnti differenziali pulsanti unidirezionali: dipende dal tipo di interruttore differenziale (tipo AC, A, B, F), come si vedrà in seguito.

## **1.4 CLASSIFICAZIONE**

Esistono diversi parametri di giudizio per effettuare una classificazione degli interruttori differenziali, elencati nel punto 4. della Norma CEI EN 61008-1, quali ad esempio metodo di funzionamento (funzionamento dipendente o indipendente dalla tensione di rete), numero di poli (bipolari, tripolari, quadripolari), metodo di installazione, e così via.



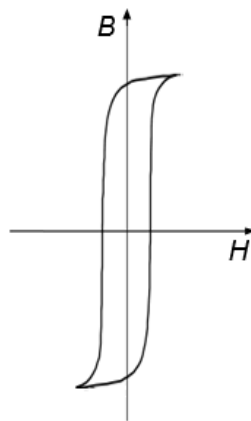
Sono due i metodi di classificazione che assumono un particolare rilievo: classificazione secondo il comportamento in presenza di correnti pulsanti unidirezionali e classificazione secondo il ritardo di intervento (in presenza di una corrente differenziale), in quanto permettono di distinguere gli interruttori differenziali in diversi tipi.

### **1.4.1 CLASSIFICAZIONE SECONDO IL COMPORTAMENTO IN PRESENZA DI CORRENTI PULSANTI UNIDIREZIONALI**

Per quanto riguarda la tipologia di corrente sul quale l'interruttore differenziale è in grado di operare, le norme a cui si è fatto riferimento finora definiscono due soli tipi di interruttori differenziali: tipo AC e tipo A. Di seguito vengono illustrate le caratteristiche dei due modelli.

#### **1.4.1.1 INTERRUTTORE DIFFERENZIALE DEL TIPO AC**

La Norma CEI EN 60947-2 lo definisce come “*interruttore differenziale per il quale l'intervento è garantito per correnti alternate sinusoidali differenziali, senza componente continua, applicate improvvisamente o crescenti gradualmente*”. Il circuito magnetico di questo dispositivo è infatti realizzato con materiali aventi cicli di isteresi molto ripidi, come mostrato in Fig. 5, che li rende poco sensibili alle correnti verso terra con componenti continue.



**Fig. 5:** Ciclo di isteresi dell'interruttore di tipo AC

Sono idonei a proteggere gli usuali impianti che alimentano utenze di tipo termico o elettromeccanico e gli apparecchi con parti elettroniche, ma che non comportano modificazioni significative della forma d'onda.

Da notare che la Norma CEI EN 61008-1 specifica, nell'allegato ZB, che in alcuni Paesi, quali ad esempio Germania e Svizzera, non è più ammesso l'utilizzo di tali dispositivi.

### 1.4.1.2 INTERRUTTORE DIFFERENZIALE DEL TIPO A

Secondo le norme ha le caratteristiche dell'interruttore del tipo AC, oltre ad assicurare lo sgancio per correnti unidirezionali differenziali pulsanti applicate improvvisamente o lentamente crescenti. A differenza del tipo AC presenta dunque una sensibilità anche alle correnti differenziali pulsanti con componente continua, e quindi può svolgere un'azione di controllo sulle correnti di guasto anche in impianti dove sono presenti dispositivi elettronici di potenza. La differenza tra interruttore differenziale del tipo AC e interruttore differenziale del tipo A è dovuta alla diversità del ciclo di isteresi: il materiale ferromagnetico utilizzato per i dispositivi del tipo A presenta un ciclo di isteresi piatto. In Fig. 6 è possibile vedere un confronto tra i cicli dei due tipi di differenziale.

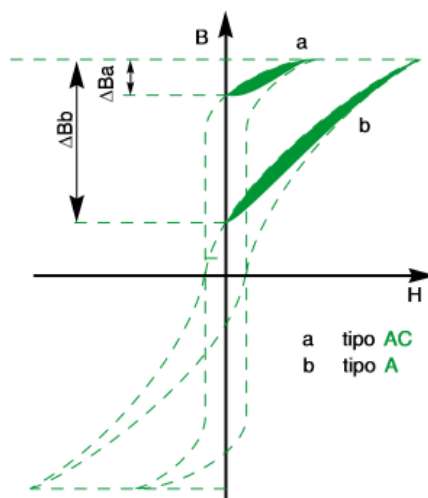


Fig. 6: Confronto tra i cicli di isteresi degli interruttori differenziali del tipo AC ed A

Gli schemi costruttivi di entrambi i dispositivi visti sono riconducibili allo schema di principio visto in precedenza.

I due tipi di interruttori automatici differenziali appena illustrati risultano tuttavia insufficienti a fronte di un sempre maggior numero di impianti in cui sono presenti dispositivi elettronici di potenza negli apparecchi utilizzatori con collegamento a terra, che possono dar luogo, sia in condizioni di guasto che in assenza di guasto, a correnti di dispersione con forme

d'onda caratterizzate da un'elevata componente continua e/o ad alta frequenza. Questo fatto pregiudica il corretto funzionamento dei dispositivi del tipo AC, non essendo progettati ad operare con correnti continue, ma anche il dispositivo del tipo A può risultare inefficace: secondo la Norma CEI EN 61008-1, una delle prove da effettuare per testare la validità di un interruttore differenziale del tipo A consiste nella verifica del corretto funzionamento in caso di corrente differenziale raddrizzata a semionda (angolo di ritardo della corrente  $\alpha = 0^\circ$ ) con sovrapposta una corrente continua senza ondulazioni di 0,006 A. Ciò significa che, in caso di corrente differenziale avente una componente continua maggiore di 6 mA, tale dispositivo non è tenuto a garantire un corretto funzionamento.

Risulta allora evidente la necessità di aggiungere nuovi tipi di dispositivi differenziali, che abbiano un campo d'azione più esteso. A tal fine è stata aggiunta la Norma CEI EN 62423, la quale introduce i tipi F e B.

#### **1.4.1.3 INTERRUPTORE DIFFERENZIALE DEL TIPO F**

Come stabilisce appunto la Norma CEI EN 62423, un dispositivo differenziale può essere classificato come “F” se, oltre a garantire l'intervento come per l'interruttore del tipo A, è in grado di assicurare la protezione in caso di:

- correnti differenziali composite, sia applicate improvvisamente sia aumentate lentamente;
- correnti pulsanti unidirezionali sovrapposte a una corrente continua senza ondulazioni di 0,01 A.

È quindi un interruttore che può garantire corretto funzionamento per correnti aventi componente continua di valore più elevato (10 mA anziché i 6 mA del tipo A) e per correnti ad elevate frequenze (comunque inferiori a 1000 Hz).

Lo schema costruttivo è analogo a quello del differenziale tipo A, e dunque riconducibile allo schema mostrato precedentemente.

Le norme definiscono i dispositivi differenziali del tipo F come “*destinati ad essere installati in impianti con inverters di frequenza alimentati tra fase e neutro o tra fase e conduttore medio di messa a terra*”.

#### 1.4.1.4 INTERRUTTORE DIFFERENZIALE DEL TIPO B

L'interruttore differenziale del tipo B risulta quello più poliedrico tra quelli descritti dalle norme; infatti, oltre a garantire la protezione nei casi descritti per i precedenti dispositivi, può anche assicurarla in caso di:

- correnti differenziali alternate sinusoidali fino a 1000 Hz;
- correnti differenziali alternate sovrapposte ad una corrente continua senza ondulazioni di 0,4 volte la corrente differenziale nominale  $I_{\Delta n}$  o 10 mA, scegliendo il valore più elevato;
- per correnti differenziali continue che possono provenire da circuiti raddrizzatori;
- correnti differenziali continue senza ondulazioni.

Le correnti differenziali sopra specificate possono essere applicate improvvisamente o aumentate lentamente indipendentemente dalla polarità.

Il fatto di poter interrompere correnti di guasto continue non deve trarre in inganno: la Norma CEI EN 62423 specifica che gli interruttori differenziali conformi a tale norma non sono destinati ad essere utilizzati nei sistemi di alimentazione in corrente continua.

La possibilità di poter interrompere anche correnti di guasto continue è dovuta al diverso schema costruttivo dell'interruttore: per interrompere un'eventuale corrente di guasto continua si utilizza infatti un secondo toroide di materiale ferromagnetico posto in serie al primo, come mostrato in Fig 7.

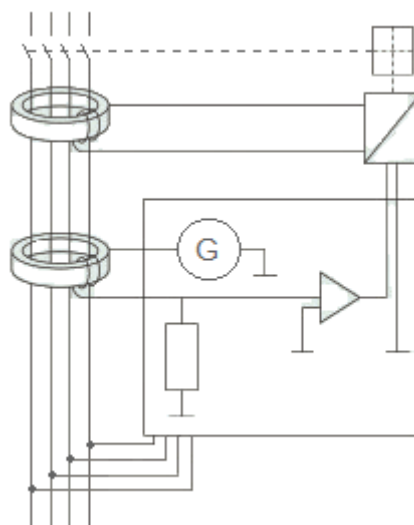


Fig. 7: Schema costruttivo dell'interruttore differenziale trifase del tipo B

Il primo toroide funziona come quello dei precedenti dispositivi, ed effettua quindi il controllo su correnti alternate, correnti composte e correnti pulsanti: quando si verifica uno squilibrio tra la corrente entrante e la corrente uscente dal sistema protetto si induce una tensione nell'avvolgimento secondario che porta all'apertura dei contatti.

Il secondo toroide si occupa invece della rilevazione di correnti di guasto continue: anche per questo toroide l'avvolgimento primario è composto dai conduttori di alimentazione del carico (compreso il neutro), mentre all'avvolgimento secondario è applicata permanentemente una tensione alternata che magnetizza il materiale ferromagnetico del toroide. La comparsa di una corrente differenziale continua porta in saturazione il nucleo toroidale, modificandone perciò la permeabilità magnetica. Un circuito elettronico in grado di rilevare l'induttanza ai capi dell'avvolgimento secondario rileva perciò una variazione di tale induttanza, e genera un segnale che, opportunamente condizionato, trasmette il comando di apertura all'attuatore.

Poiché l'avvolgimento secondario del toroide incaricato di controllare la corrente differenziale continua deve essere permanentemente alimentato, è evidente la necessità di un'alimentazione: questa può provenire da un punto esterno all'impianto o direttamente dalla fase. Nel secondo caso si presenta però il rischio di rendere inutilizzabile l'interruttore nel caso si interrompa accidentalmente il filo di alimentazione del differenziale.

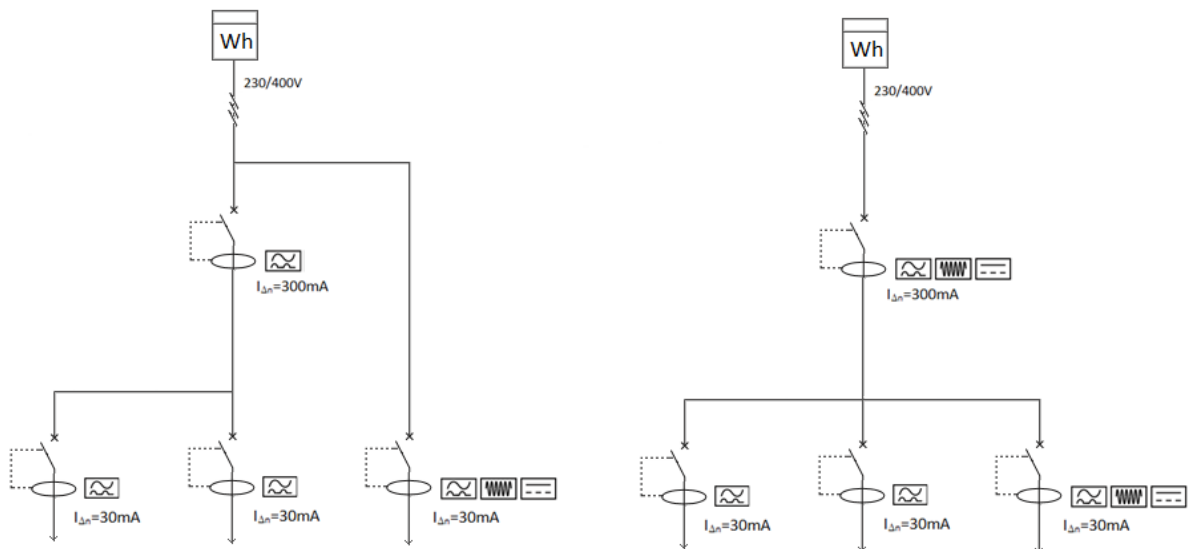



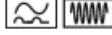











Fig. 8: Esempi di disposizione corretta di un differenziale di tipo B in un impianto con più differenziali di diverso tipo

Il fatto che l'interruttore differenziale del tipo B sia l'unico a poter interrompere una corrente di guasto continua rende obbligatorio seguire un criterio nella disposizione degli interruttori

differenziali in sistemi aventi più dispositivi di diverso tipo. Essendo infatti gli interruttori del tipo AC, A ed F non progettati per intervenire con correnti continue, se fossero attraversati da correnti di guasto continue il loro funzionamento potrebbe essere compromesso. Per evitare ciò è necessario derivare l'alimentazione del differenziale di tipo B a monte di eventuali interruttori differenziali di diverso tipo, oppure mettere a monte un differenziale di tipo B. Questi due collegamenti sono mostrati in Fig. 8, in cui si possono distinguere i differenziali di diverso tipo per mezzo dei simboli al loro fianco. Tali simboli vengono assegnati ai dispositivi seguendo le indicazioni date dalle norme CEI EN 60947-2 e CEI EN 62423.

Di seguito si riporta uno schema riassuntivo dei quattro tipi di differenziali presentati dalle norme in relazione ai tipi di correnti a cui possono operare:

Forma della corrente differenziale	Tipo di interruttore differenziale			
	AC	A	F	B
				
	-	■	■	■
	-	■	■	■
	-	■	■	■
	-	-	■	■
	-	-	■	■
	-	-	-	■
	-	-	-	■
	-	-	-	■
	-	-	-	■
	-	-	-	■

Tab 2: Schema riassuntivo dei vari tipi di differenziale

Gli interruttori differenziali mostrati sono solo quelli descritti dalle norme. In realtà ogni costruttore sviluppa anche dispositivi diversi da quelli descritti, per rispondere a particolari esi-

genze, quali ad esempio garantire corretto funzionamento sotto certi tipi di ambienti con determinate condizioni climatiche, e inevitabilmente con l'evolversi della tecnologia vengono apportate modifiche ai dispositivi differenziali per migliorarne le prestazioni. In particolare sono stati sviluppati diversi tipi di interruttori differenziali automatici immuni agli scatti intempestivi, ossia l'intervento del dispositivo senza che ve ne sia un reale bisogno. Nel corso dell'elaborato sarà studiata tale problematica e verranno presentati alcuni dei dispositivi ad essa immuni tutt'ora in commercio per diversi costruttori.

## 1.4.2 CLASSIFICAZIONE SECONDO IL RITARDO DI INTERVENTO

E' possibile distinguere in due famiglie gli interruttori automatici differenziale dal punto di vista della tempestività dell'intervento in quanto alcuni dispositivi vengono progettati per intervenire con un prefissato ritardo. Si possono allora distinguere

- Interruttori differenziali di tipo generale: non hanno un ritardo intenzionale;
- Interruttori differenziali di tipo selettivo S: hanno un ritardo intenzionale

Progettare un ritardo intenzionale dell'intervento dell'interruttore può essere dettato da diverse motivazioni, tra cui quella di garantire la selettività. Per selettività si intende il coordinamento dei dispositivi di protezione posti nello stesso impianto: a fronte di un guasto è auspicabile che intervenga solo l'interruttore più vicino, sia per consentire una rapida localizzazione del punto di guasto, sia per limitare il più possibile la parte d'impianto posta automaticamente fuori servizio. A tale scopo, si considera il caso di due interruttori differenziali in serie e si illustra la selettività verticale:

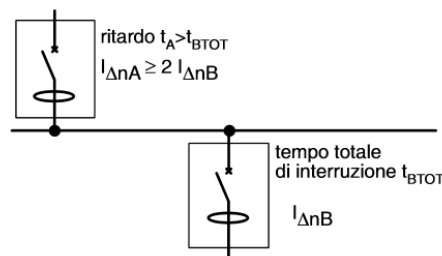


Fig. 9: Esempio di selettività verticale

In caso di guasto a valle dell'impianto di Fig 9, si auspica l'intervento del solo dispositivo B. Per garantire ciò è necessario che il coordinamento selettivo tra i due interruttori soddisfi le seguenti condizioni:

- La corrente differenziale d'intervento nominale del dispositivo a monte A deve essere almeno il doppio di quella del dispositivo a valle B, ossia  $I_{\Delta nA} \geq 2 I_{\Delta nB}$ . Questo è dovuto al fatto che le norme richiedono, come già illustrato nella presentazione delle grandezze caratteristiche degli interruttori differenziali, che l'interruttore garantisca il non-intervento per una corrente pari alla metà della propria corrente differenziale d'intervento nominale. Questo concede quindi un campo di tolleranza d'intervento della protezione differenziale; a tale scopo l'interruttore a monte deve presentare un campo di tolleranza d'intervento il cui estremo inferiore coincida con il valore di corrente differenziale che comporta l'intervento sicuro del dispositivo a valle;
- Il ritardo intenzionale  $t_A$  dell'interruttore a monte deve essere superiore al tempo totale di interruzione  $t_{TOT}$  del dispositivo a valle, ossia  $t_A \geq t_{TOT}$ . Ne deriva che l'interruttore a monte debba essere un dispositivo di tipo selettivo S. Le durate limite di interruzione per gli interruttori di tipo generale sono fornite dalla Norma CEI EN 61008-1 in funzione del valore efficace della corrente differenziale (i valori dati da tale norma riguardano gli interruttori di tipo AC ed A, ma la Norma CEI EN 62423 fornisce gli stessi valori per gli interruttori B ed F); in funzione di questi sono forniti i valori limite della durata di non-intervento degli interruttori di tipo selettivo.

Valori limite della(e) durata(e) di interruzione e di non intervento per interruttori differenziali di tipo AC ed A in caso di correnti differenziali alternate (valori efficaci) uguali a									
Tipo	$I_n$ [A]	$I_{\Delta n}$ [A]	$I_{\Delta n}$	$2 I_{\Delta n}$	$5 I_{\Delta n}$	$5 I_{\Delta n}$ o $0,25 A^a$	$5 A - 200 A^b$	$500 A$	
Generale	Qualsiasi	< 0,03	0,3	0,15		0,04	0,04	0,04	Durate massime di interruzione
		0,03	0,3	0,15		0,04	0,04	0,04	
		> 0,03	0,3	0,15	0,04		0,04	0,04	
S	≥ 25	> 0,03	0,5	0,2	0,15		0,15	0,15	Durate minime di non intervento
		> 0,03	0,13	0,06	0,05		0,04	0,04	

<sup>a</sup>: valore da decidere da parte del costruttore per questa prova  
<sup>b</sup>: le prove si effettuano solo durante la verifica del funzionamento corretto

Tab. 3: Valori limite della durata di intervento e non-intervento

Si può notare che i valori limite della durata di intervento degli interruttori di tipo generale coincidono con i valori limite della durata di non-intervento degli interruttori di tipo selettivo.



E' possibile presentare qualitativamente anche graficamente le caratteristiche tempo-corrente che devono avere i dispositivi di tipo selettivo rispetto ai dispositivi di tipo generale in serie:

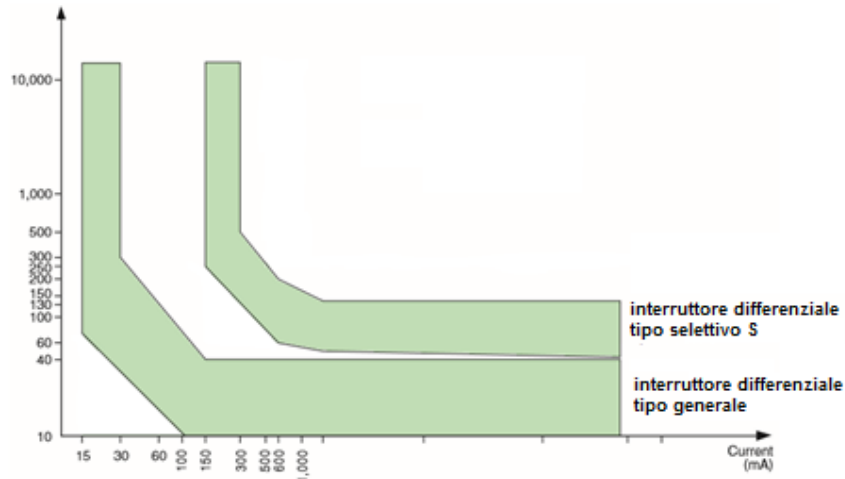


Fig. 10: Caratteristiche tempo-corrente di interruttore selettivo e interruttore generale

Si nota che la caratteristica di non-intervento del dispositivo di tipo selettivo deve trovarsi al di sopra della caratteristica di intervento del dispositivo di tipo generale, e le relative zone di intervento non si sovrappongono.

Il caso appena illustrato è quello di selettività verticale a due livelli, ma la selettività verticale può essere disposta su numerosi livelli, seguendo le indicazioni appena fornite per l'esempio visto.

E' stata così offerta una panoramica sugli interruttori automatici differenziali: campo di utilizzo, principio di funzionamento, caratteristiche e distinzione di classi in base al tipo di corrente differenziale e al tempo di intervento.

Si vedranno ora le problematiche che comportano la non idealità del funzionamento di tali dispositivi, studiandone le cause e i possibili rimedi.



## CAPITOLO 2

# *PROBLEMATICHE DOVUTE ALLA NON IDEALITÀ DELL'INTERRUTTORE DIFFERENZIALE*

### 2.1 *INTRODUZIONE*

Finora sono state illustrate le caratteristiche salienti degli interruttori automatici differenziali, descrivendone l'uso, le classificazioni ed il principio di funzionamento. Sono stati però ignorati i malfunzionamenti, dovuti alla non idealità dei dispositivi. I malfunzionamenti che possono presentare gli interruttori differenziali sono principalmente due: intervento (o scatto) intempestivo e mancato intervento.

Col termine scatto intempestivo si identifica il caso in cui il dispositivo differenziale intervenga nonostante non ci siano evidenti condizioni che richiedono la necessità dell'intervento, quali ad esempio un guasto nell'isolamento. Tale situazione può essere estremamente dannosa a livello economico in ambiente industriale: poiché l'intervento di un dispositivo differenziale porta al distacco dell'alimentazione dell'impianto a cui esso è applicato, in caso di scatto intempestivo si avrà un'interruzione apparentemente immotivata dell'alimentazione del sistema con conseguente mancanza di servizio. Il danno economico può essere quantificato attraverso una formula di mancato servizio:

$$P = n * (T_i + T_r) * (R - C)$$

dove: P = perdite economiche annuali

n = occorrenze di interventi intempestivi

T<sub>i</sub> = durata dell'interruzione dovuta all'intervento intempestivo

T<sub>r</sub> = tempo di ripristino dell'alimentazione

R = mancato profitto dovuto all'impianto intempestivo

C = costi non sostenuti durante la durata dell'interruzione

Il tempo di ripristino può essere ridotto attraverso l'utilizzo di dispositivi di riarmo automatici: a tale scopo, per esempio, il gruppo industriale Schneider Electric ha sviluppato interruttori differenziali a riarmo automatico RED (Riarmo E Differenziale), REDs e REDtest, i quali, oltre ad effettuare la funzione di dispositivo differenziale, garantiscono anche il riarmo automatico (ovvero la richiusura dei contatti dell'alimentazione) in seguito a un controllo dello stato dell'isolamento a valle. È l'interruttore stesso ad eseguire la verifica: non appena l'interruttore si apre inizia la fase di controllo, che dura 90 s ed è segnalata dal lampeggiamento di un LED apposito sul dispositivo; una volta terminata la fase di controllo avviene il riarmo ed il LED si spegne. In caso di guasto nell'impianto, al termine della fase di controllo non avviene il riarmo dell'interruttore e il LED resta acceso per segnalare il guasto.

È comunque evidente che, oltre a poter causare un danno economico, la presenza di scatti intempestivi può anche portare rischi legati alla sicurezza, ad esempio nel caso in cui la mancanza di alimentazione dovuta all'intervento del dispositivo possa interessare impianti di allarme.

Per mancato intervento si intende invece la situazione opposta, ossia nonostante la presenza di condizioni in cui è richiesto l'intervento del dispositivo differenziale, quest'ultimo non interviene. Ne consegue che questa situazione, oltre a comportare un rischio per l'impianto stesso, comporta un rischio per gli esseri umani che, in caso di contatto diretto o indiretto, si ritroverebbero soggetti a correnti di guasto senza che intervenga alcuna protezione.

La gravità dei malfunzionamenti citati e l'ampia diffusione degli interruttori differenziali, sia in ambito domestico che industriale, rende necessario uno studio approfondito di tali dispositivi per poter ottenere l'efficacia della protezione che essi dovrebbero garantire. E' quindi necessario osservare il comportamento di tali dispositivi in modo da comprendere le condizioni e le cause che comportano un intervento intempestivo o un mancato intervento dell'interruttore. L'argomento è tutt'ora materia di discussione in quanto lo studio dei malfunzionamenti degli interruttori differenziali è estremamente complesso: essi infatti non dipendono tanto dai difetti dei dispositivi differenziali quanto alla scarsa qualità dell'energia elettrica, alle non idealità che si presentano nella rete, nell'impianto e nei dispositivi utilizzati. Le stesse norme che trattano i dispositivi differenziali considerano solo correnti con forme d'onda standard, nonostante numerosi test abbiano evidenziato che la principale causa dei malfunzionamenti degli interruttori differenziali è la presenza di correnti distorte; le verifiche di corretto funzionamento descritte dalle norme sono presentate nel Capitolo 3.

Di seguito vengono perciò riportati i risultati di alcune ricerche condotte su interruttori differenziali sottoposti a diverse forme di corrente: sarà illustrato come correnti distorte in diversi modi influenzano il comportamento dei dispositivi differenziali e quindi i motivi dei malfunzionamenti caso per caso.

## **2.2 LEGAME TRA CORRENTE D'INTERVENTO E FREQUENZA**

Poiché le norme di riferimento considerano le sole correnti con andamento standard, durante uno studio si è deciso di confrontare, in condizioni di regime, il comportamento di un interruttore differenziale in presenza di una corrente differenziale con andamento sinusoidale puro, ossia la forma d'onda di corrente cui fanno riferimento, in condizione di normale funzionamento, le norme CEI EN 61008-1, CEI EN 61009-1 e CEI EN 62423 (le norme che regolano le condizioni di funzionamento degli interruttori di tipo AC, A, F e B, presentati precedentemente) ed il comportamento in presenza di correnti contenenti armoniche.

Per lo studio è stato scelto un gruppo di dispositivi differenziali campione del tipo AC con una corrente differenziale d'intervento nominale  $I_{\Delta n} = 30 \text{ mA}$ . Per verificarne il comportamento, ad essi sono state applicate correnti di diverse forme d'onda e sono stati registrati i valori minimi di tali correnti che hanno causato l'intervento degli interruttori stessi. Secondo quanto specificato dalla Norma CEI EN 61008-1, il dispositivo differenziale deve garantire il non-intervento per correnti di valore efficace pari a  $0,5 I_{\Delta n}$  e garantire l'intervento per correnti pari  $I_{\Delta n}$ . Ne consegue che, per l'esperimento condotto, un intervento in corrispondenza di una corrente al di fuori dell'intervallo [15 mA ; 30 mA] è da considerarsi intempestivo.

Durante lo studio del comportamento del dispositivo in presenza di una corrente sinusoidale pura, si è applicata una corrente con questa forma d'onda per un intervallo di frequenze da 50 Hz a 1500 Hz. La corrente applicata viene incrementata partendo da un valore di 0 A fino al valore che fa scattare il campione; tale valore viene perciò registrato come valore di corrente di intervento corrispondente alla frequenza della corrente stessa. In Fig. 11 è riportato l'andamento delle correnti d'intervento registrate secondo il metodo descritto: è possibile notare che per 50 Hz, ovvero la frequenza nominale del dispositivo, si ha una corrente d'intervento di circa 23 mA, la quale cresce gradualmente fino alla frequenza di 1 kHz, in corrispondenza della quale si nota un incremento significativo fino a raggiungere una corrente d'intervento di 1 A, in corrispondenza di

una frequenza di 1,4 kHz. Questo andamento può trovare una spiegazione qualitativa se si considera la forza magnetica che si oppone alla forza di attrazione esercitata sull'ancora per aprire i contatti, come illustrato nel principio di funzionamento: ad alte frequenze aumentano le perdite per isteresi e per correnti parassite, e oltre a questo la forza magnetica viene applicata per un tempo minore; dunque è necessaria una corrente d'intervento maggiore per ottenere una forza magnetica tale da attivare il meccanismo di apertura.

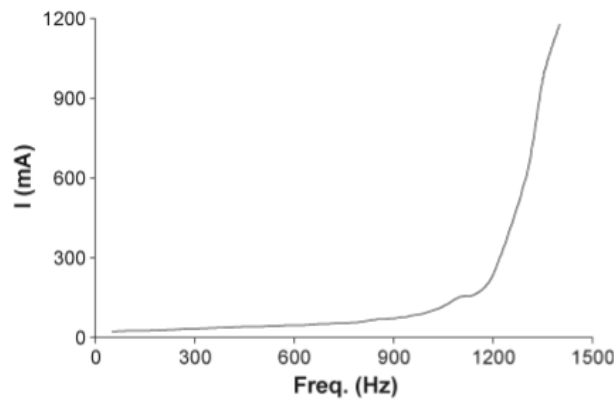


Fig. 11: Corrente d'intervento al variare della frequenza per correnti sinusoidali pure

È evidente allora che, nonostante la corrente applicata sia puramente sinusoidale, il dispositivo garantisce un corretto funzionamento solo per un intervallo ristretto di frequenze, rilevandosi di conseguenza inefficace per frequenze elevate. Questo aspetto rappresenta una problematica non trascurabile in quanto le apparecchiature di elettronica di potenza, sempre più diffuse, introducono nelle correnti componenti ad elevata frequenza, a cui perciò gli interruttori differenziali si rivelano insensibili.

In una seconda fase dello studio si è studiato il comportamento degli interruttori differenziali in presenza di una corrente contenente armoniche di basso ordine: si sono perciò applicate ai campioni correnti contenenti la componente fondamentale a 50 Hz e una componente armonica del 3° ordine con un'ampiezza pari al 10% dell'ampiezza della componente fondamentale, o del 5° ordine con un'ampiezza del 25%. Durante questo esperimento non sono state variate le frequenze delle componenti delle correnti applicate, ma sono stati variati gli angoli di fase delle armoniche rispetto alla fondamentale. L'andamento della corrente d'intervento al variare dell'angolo di fase della componente armonica è riportato in Fig. 12, dove sono stati evidenziati gli andamenti della corrente d'intervento per una corrente a 50 Hz sinusoidale pura (che si è visto nella prima fase dell'esperimento essere poco maggiore di 23 mA, e costante al variare dell'an-

golo di fase delle armoniche in quanto non ne contiene), corrente d'intervento in presenza della terza armonica e corrente d'intervento in presenza della quinta armonica.

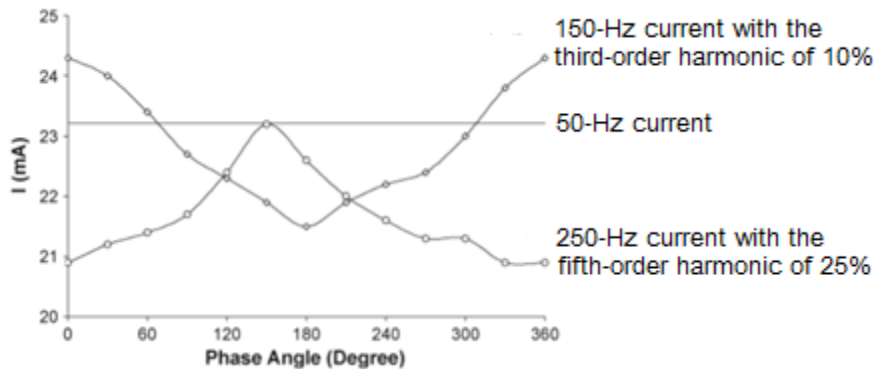


Fig. 12: Corrente d'intervento al variare dell'angolo di fase delle armoniche del 3° e del 5° ordine

Con la presenza di una componente armonica si possono notare correnti d'intervento maggiori e minori rispetto al valore che si ha per correnti puramente sinusoidali. È perciò evidente che correnti distorte influenzano lo scatto dei dispositivi differenziali, e ciò rende necessario studiarne l'influenza sul comportamento degli interruttori: tale studio sarà illustrato in un secondo momento.

Nell'ultima fase si osserva il comportamento dell'interruttore in presenza di armoniche di ordine elevato. A tal fine si applica una corrente contenente, oltre alla componente fondamentale a 50 Hz, una componente armonica del 9° ordine con ampiezza pari al 10% dell'ampiezza della fondamentale o una componente armonica dell'11° ordine con ampiezza del 25%.

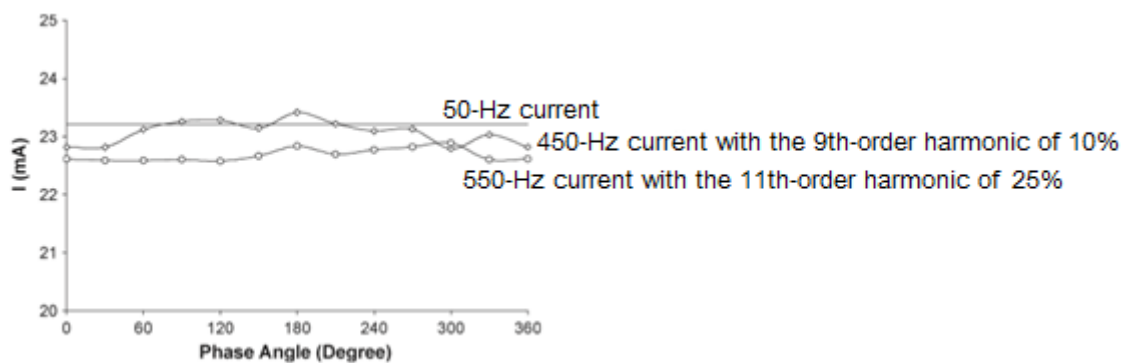


Fig. 13: Corrente d'intervento al variare dell'angolo di fase delle armoniche del 9° e dell'11° ordine

Anche in questo caso si osserva l'andamento della corrente d'intervento in funzione dell'angolo di fase delle componenti armoniche rispetto alla fondamentale. Gli andamenti sono illustrati in Fig. 13; si nota una variazione della corrente d'intervento meno influente rispetto alla variazione ap-

portata dalle armoniche di basso ordine. Dunque è lecito pensare che armoniche di basso ordine influenzino più significativamente il comportamento degli interruttori rispetto alle armoniche di ordine elevato.

Va comunque specificato che durante il lavoro appena illustrato sono state considerate correnti aventi un'unica componente armonica, situazione poco realistica in quanto generalmente nelle correnti distorte sono presenti più componenti a frequenza diversa da quella fondamentale. Durante lo studio delle armoniche sarà affrontata l'influenza che esse esercitano sul comportamento degli interruttori automatici differenziali, evidenziando la differenza del contributo legato all'ordine delle armoniche e alla loro ampiezza.

Ad ogni modo non va trascurato il risultato della prima fase dello studio appena presentato, ossia l'influenza delle alte frequenze sul comportamento dell'interruttore differenziale. Dunque prima di occuparsi dell'influenza delle armoniche è bene approfondire quest'aspetto.

## **2.3 *COMPORAMENTO DEGLI INTERRUTTORI DIFFERENZIALI ALLE ALTE FREQUENZE***

Il comportamento in condizioni di regime degli interruttori automatici differenziali può ritenersi completamente noto per correnti di guasto alla frequenza di rete 50 Hz poiché le norme a cui riferirsi lo determinano come il valore di frequenza nominale preferibile, e dunque i costruttori forniscono i valori dei parametri nominali riferendosi a correnti a 50 Hz. È però consigliabile interessarsi anche a valori di frequenza maggiori a causa dell'ampia diffusione di azionamenti elettrici, di filtri e in generale di carichi non lineari, che introducono componenti di corrente ad elevate frequenze (fino a decine di kHz). Oltre a questo, alcune particolari installazioni hanno frequenza nominale pari a 400 Hz (ad esempio alcuni impianti negli aeroporti).

È stato mostrato precedentemente che l'alta frequenza influenza negativamente il comportamento dei dispositivi differenziali: è dunque necessario verificare il corretto funzionamento dei dispositivi quando si è in presenza di frequenze elevate. A tale scopo è stato svolto un progetto di ricerca, in cui si analizza il comportamento di diversi tipi di interruttore differenziale realizzati da quattro diversi costruttori per alte frequenze. Per verificare il corretto funzionamento dei dispositivi in esame ad alte frequenze si deve verificare che:



- Rispettino le curve di sicurezza corrente-tempo (fornite dalla Norma IEC 60479-1, già mostrata in Fig. 2) anche per elevati valori di frequenza
- Presentino immunità agli interventi intempestivi in presenza di distorsioni armoniche

Per lo sviluppo del modello utilizzato per svolgere il progetto si sono trascurati gli effetti dovuti alla saturazione del trasformatore differenziale e del relè. Tali effetti, che saranno discussi in seguito, non possono essere trascurabili per interruttori differenziali non ad elevata sensibilità, per cui si sono presi in considerazione unicamente dispositivi con corrente differenziale d'intervento nominale di 30 mA ed i risultati ottenuti non possono essere estesi a dispositivi con sensibilità inferiore.

Per questa ricerca sono stati utilizzati interruttori differenziali puri monofase del tipo AC ed A ad intervento istantaneo, realizzati da quattro diverse aziende, indicate con le lettere A, B, C, D. Sono stati inoltre considerati diversi tipi di accoppiamento tra trasformatore differenziale e relè: tale collegamento può essere diretto (d), tramite condensatori di risonanza (c), o per mezzo di una scheda elettronica (e).

Per effettuare le verifiche di cui prima, è necessario svolgere cinque esperimenti:

1. Transitorio di apertura
2. Corrente d'intervento alle alte frequenze
3. Tempo d'intervento alle alte frequenze
4. Intervento in presenza della 3<sup>a</sup> armonica
5. Immunità agli scatti intempestivi

Durante questi esperimenti si definiscono la corrente d'intervento e la corrente di non-intervento come, rispettivamente, la massima e la minima corrente d'intervento in cinque esperimenti consecutivi.

Prima di proseguire con l'illustrazione dei risultati degli esperimenti è bene introdurre il Fattore di frequenza  $F_f$ , descritto dalla Norma IEC 60479-2 come un fattore correttivo che lega la variazione delle soglie degli effetti fisiologici sugli esseri umani all'aumentare della frequenza. Tale fattore può essere riferito alla soglia di percezione, alla soglia di contrazione muscolare o alla soglia di fibrillazione ventricolare. Per ciascuna soglia, la norma fornisce un andamento di  $F_f$  in funzione della frequenza, fino a 10 kHz (il valore di  $F_f$  varia in base alla soglia che si sta considerando). In Fig. 14 viene riportato l'andamento di tale fattore in funzione della frequenza consi-

derando l'intervallo [50 Hz ; 1000 Hz]:

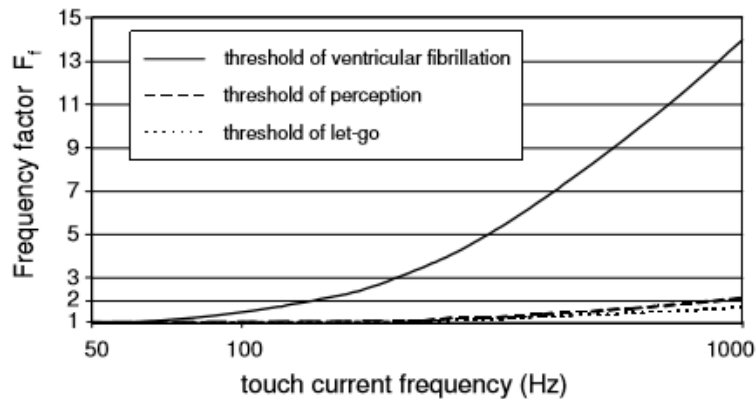


Fig. 14: Variazione di  $F_f$  in funzione della frequenza della corrente di guasto relativa a ogni tipo di effetto fisiologico della corrente stessa

Questo fattore deve essere moltiplicato per il valore di sicurezza a 50 Hz. L'autore di questo studio ha scelto  $F_f$  considerando la probabilità di fibrillazione ventricolare ad alte frequenze, secondo la seguente tabella:

$f$ [Hz]	$F_f$ [-]	< 300 ms		< 150 ms		< 40 ms	
		$F_f I_{\Delta n}$ [mA]	results	$2 F_f I_{\Delta n}$ [mA]	results	$5 F_f I_{\Delta n}$ [mA]	results
50	1	30	s	60	s	150	s
100	1,5	45	s	90	s	225	s
200	2	60	f	120	s	300	s
300	4,5	135	f	270	f	675	s
400	5,8	173	f	345	f	863	f
500	7	210	f	420	f	1050	f
600	9,2	277	f	553	f	1383	f
700	10,8	324	f	649	f	1621	f
800	12	360	f	720	f	1800	f
900	13	390	f	780	f	1950	f
1000	14	420	f	840	f	2100	f

Tab. 4: Tempo di intervento di dispositivi del tipo A/c; s: successo dell'intervento, f: fallimento

Da Tab. 4 si può notare che più è alta la frequenza, più è bassa la probabilità di fibrillazione ventricolare. Tenendo presente che negli impianti di bassa tensione la tensione verso terra è generalmente minore di 230 V e che la resistenza dell'uomo è generalmente maggiore di 600  $\Omega$  (secondo la Norma IEC 60479-1 per il 5% della popolazione si può considerare una resistenza interna pari a 500  $\Omega$ , per il 50% si considera 750  $\Omega$  e per il 95% 1000  $\Omega$ ), si può stabilire come massima corrente di guasto verso terra la seguente:

$$\frac{230 \text{ V}}{600 \Omega} = 383 \text{ mA}$$

Stabilito questo, poiché  $383 \text{ mA} < 420 \text{ mA}$ , si può dire, osservando Tab. 4, che la più alta frequenza d'interesse è la 1000 Hz, a cui corrisponde un  $F_f = 14$ . Si può avere conferma del valore di  $F_f$  moltiplicando la corrente differenziale d'intervento dei dispositivi che si considerano nell'esperimento per il Fattore di frequenza stesso:

$$30 \text{ mA} * 14 = 420 \text{ mA}$$

come appunto riporta Tab. 4. Si considererà perciò la frequenza di 1000 Hz come frequenza limite.

### 1. Transitorio di apertura

Per questo esperimento si sono utilizzati interruttori differenziali del tipo AC/d del costruttore A: a questi interruttori viene applicata in una prima fase una corrente (che simula la corrente differenziale) lentamente crescente, e in una seconda fase una corrente che soddisfa istantaneamente le condizioni di intervento del dispositivo. Si osservano allora due comportamenti diversi: quando la corrente cresce lentamente l'interruttore AC/d in esame interviene con valori di corrente differenziale superiori rispetto ai valori per cui interviene quando la corrente è applicata istantaneamente.

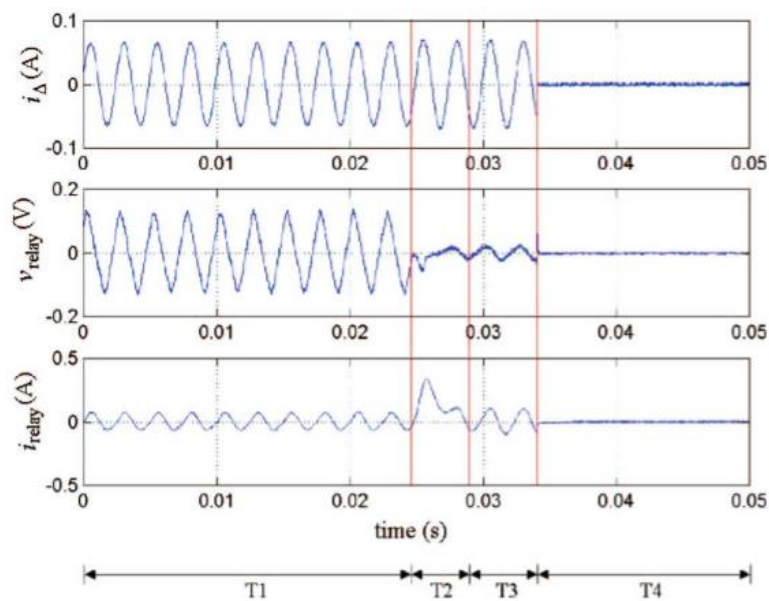


Fig. 15: Transitorio di apertura in presenza di una corrente lentamente crescente

Si consideri l'applicazione di una corrente lentamente crescente: gli andamenti delle grandezze in gioco sono riportati in Fig.15. Si possono distinguere quattro intervalli di tempo: T1, in cui la corrente differenziale cresce lentamente fino a raggiungere le condizioni d'innesco dell'interruttore; T2 e T3, in cui avviene il transitorio di apertura dei contatti; T4, in cui la corrente differenziale si annulla a causa della riuscita apertura dei contatti. Il transitorio si può dunque distinguere in due fasi: in T2, poiché i contatti cominciano ad allontanarsi aumentando il traferro e quindi la riluttanza, si assiste ad un aumento della corrente sottoposta al relè  $i_{\text{relay}}$  per mantenere l'equilibrio nella relazione  $\Re\phi = Ni_{\text{relay}}$ . La fase T3 può essere invece attribuita all'inerzia meccanica dei contatti per aprirsi.

## 2. Corrente residua di funzionamento ad alte frequenze

Durante quest'esperimento si osserva il comportamento degli interruttori AC/d dei diversi costruttori all'aumentare della frequenza di una corrente sinusoidale. Come già verificato nello studio precedentemente illustrato, la crescita della frequenza comporta un incremento graduale della corrente di intervento del dispositivo. In Fig. 16 i quattro dispositivi AC/d mostrano infatti lo stesso andamento qualitativo, la pendenza diversa è principalmente dovuta al modello costruttivo del relè.

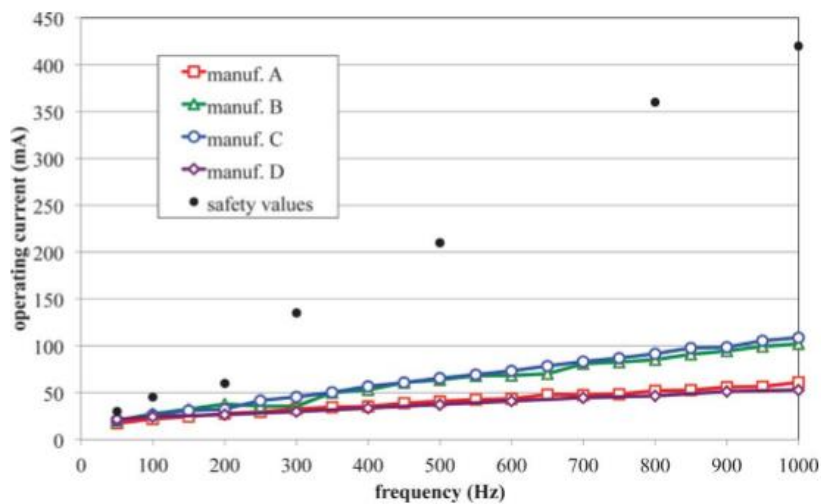


Fig. 16: Valore efficace delle correnti di intervento dei dispositivi AC/d

Le correnti di intervento sono state confrontate con i valori di sicurezza, ottenuti attraverso il Fattore di frequenza  $F_f$ . Tutti i dispositivi garantiscono la protezione nell'intervallo di frequenze considerato. È invece possibile ottenere risultati diversi considerando differenti dispositivi: si riportano nella seguente figura le misure fatte a interruttori del tipo A con collegamento tra tra-

sformatore e relè tramite capacità di risonanza o per mezzo di una scheda elettronica.

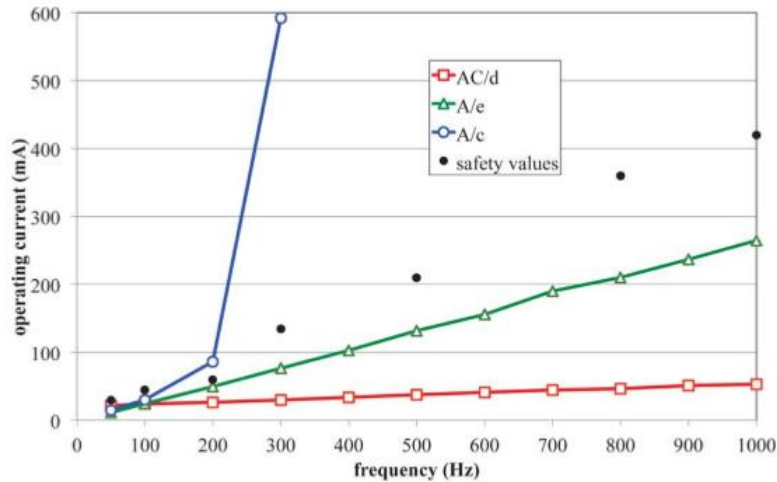


Fig. 17: Confronto tra i comportamenti di interruttori differenziali diversi

Viene illustrato in Fig. 17 il confronto tra il comportamento dei due interruttori detti e quello dell'interruttore AC/d già visto in Fig. 16. È possibile notare che, mentre il dispositivo A/e rientra nelle condizioni di sicurezza seppur presenti correnti d'intervento superiori a quelle dell'interruttore AC/d, il dispositivo differenziale A/c mostra un andamento esponenziale e non rispetta le condizioni di sicurezza già alla frequenza di 200 Hz. Questo comportamento è comune a tutti i dispositivi equipaggiati da capacitori, in quanto per alte frequenze il relè viene cortocircuitato dal capacitore stesso, essendo connesso in parallelo. Ne consegue che gli interruttori differenziali con collegamento tra trasformatore e relè tramite capacità di risonanza non sono adatti al funzionamento per alte frequenze, dunque vengono esclusi dallo studio dei rimanenti esperimenti del progetto di ricerca.

### 3. Tempo di intervento ad alte frequenze

Gli esperimenti svolti finora sono stati effettuati utilizzando modelli che non tengono conto del ritardo dell'intervento dei dispositivi. Diventa allora necessario studiarne il tempo di intervento per verificare l'efficacia della protezione anche ad elevate frequenze. È già stato accennato che il tempo di intervento è composto da due componenti: una legata al tempo richiesto per aprire i contatti, che si può considerare costante col variare della frequenza, e una componente legata al tempo che richiede il flusso magnetico per raggiungere la soglia di intervento. Quest'ultima componente dipende dalle caratteristiche della corrente residua, quali ad esempio valore iniziale e forma d'onda. I tempi di intervento dei dispositivi del tipo AC/d e A/e sono stati allora

misurati e confrontati con la caratteristica di intervento corrente-tempo, definita dalla Norma CEI EN 61009-1. Tale caratteristica è riferita alla frequenza di 50 Hz (di conseguenza i valori vanno adattati tramite l'utilizzo di  $F_f$ ), e indica i tempi limite di intervento (e di non intervento) per 3 classi di corrente di intervento istantaneo del dispositivo, in funzione di diversi correnti di prova (da  $1,3 I_n$  a  $20 I_n$ ).

Gli esperimenti hanno mostrato che sia AC/d che A/e hanno un tempo di intervento molto inferiore rispetto ai valori indicati dalla norma, per cui si può dire che questi dispositivi mantengono la loro funzione di protezione anche per elevate frequenze.

#### 4. Intervento in presenza di armonica del 3° ordine

Sono essenzialmente due le cause della presenza di componenti ad elevate frequenze:

- L'impedenza fase-terra dell'isolamento decresce all'aumentare della frequenza a causa delle capacità parassite, la cui reattanza è inversamente proporzionale alla frequenza
- I filtri di modo comune dei dispositivi di elettronica di potenza

In questo esperimento si considera la pre-esistenza della 3<sup>a</sup> armonica nella corrente, e si studia il comportamento dell'interruttore differenziale del tipo AC/d di tre diversi costruttori (A, B, C) in presenza di componenti a 150 Hz di differente ampiezza e differente angolo di fase.

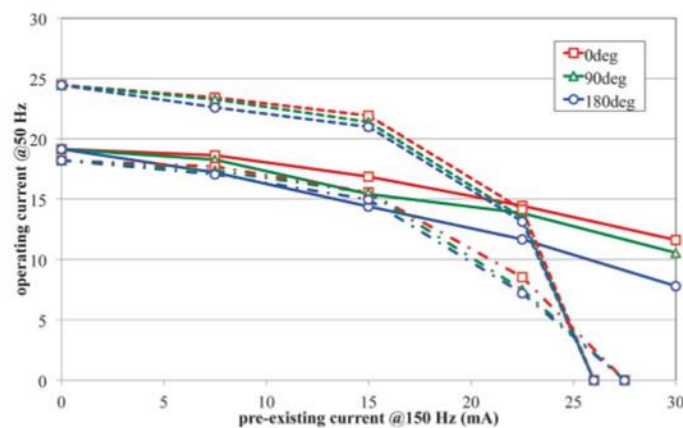


Fig. 18: Effetto della presenza della 3<sup>a</sup> armonica sfasata rispetto alla componente fondamentale. La linea continua identifica il costruttore A, quella tratteggiata il costruttore B e la discontinua il costruttore C

I risultati sono mostrati in Fig. 18: come si può osservare, la presenza della terza armonica aumenta la sensibilità del differenziale, causando l'intervento per correnti differenziali inferiori a  $I_{\Delta n}$ . L'effetto è amplificato incrementando lo sfasamento tra terza armonica e fondamentale. Il risulta-

to ottenuto è concorde con quanto illustrato nello studio precedente.

## 5. Immunità agli scatti intempestivi

Si è visto che all'aumentare della frequenza cresce il valore della corrente di intervento. Sperimentalmente si è ricavato il valore della corrente di non-intervento:

$$I_{\Delta} = (0.45 + 0.55 * 10^{-3} f) I_{\Delta n}$$

Si può perciò dire che maggiore è la frequenza e maggiore è l'immunità da scatti intempestivi. D'altro canto, come già detto, più cresce la corrente di intervento e minore è la protezione garantita in quanto può non essere rispettata la curva di sicurezza corrente-tempo.

Quanto visto finora non è sufficientemente esauriente per valutare l'impatto delle armoniche sul funzionamento degli interruttori automatici differenziali. Si procede allora analizzando il comportamento dei dispositivi differenziali in presenza di correnti con componenti armoniche di basso o di elevato ordine, con diverse ampiezze e diversi angoli di fase.

## 2.4 IMPATTO DELLE ARMONICHE SUL COMPORTAMENTO DEGLI INTERRUITORI DIFFERENZIALI

È già stato accennato che la presenza di componenti armoniche nella corrente di dispersione verso terra è in parte imputabile alla presenza di dispositivi elettronici di potenza. Al fine di chiarire tale concetto, si consideri allora un modello di azionamento (Fig. 19):

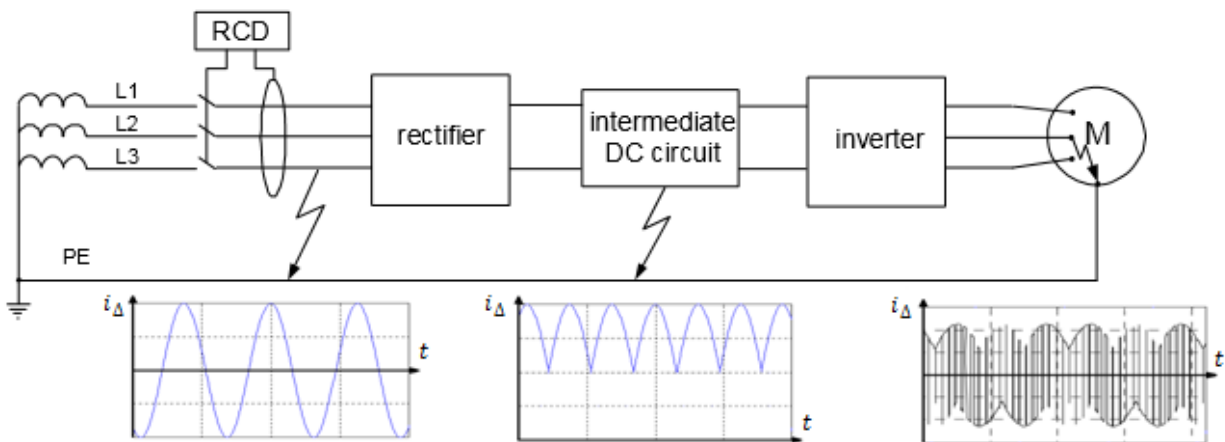


Fig. 19: Forme d'onda di guasti verso terra per un azionamento elettrico

Partendo dal generatore è possibile distinguere un primo stadio costituito da un raddrizzatore, uno stadio intermedio in cui viene filtrata la tensione pulsante in uscita dal primo stadio, ed un ultimo stadio costituito da un inverter che, utilizzando la tensione in uscita dal circuito intermedio, produce una tensione alternata alla frequenza desiderata, tramite la modulazione PWM (Pulse Width Modulation). È evidente che in base al punto in cui avviene il guasto la corrente di guasto verso terra ha componenti in frequenza diverse, si possono avere sia frequenze basse che frequenze alte. Tale corrente è inoltre distorta e contiene componenti armoniche, il cui ordine dipende dalla frequenza della modulazione PWM.

Si può dire che in genere la corrente di guasto verso terra comprende una componente a bassa frequenza che dipende dalla velocità del motore desiderata, una componente fissa a 150 Hz (la 3<sup>a</sup> armonica) e una componente alla frequenza della modulazione PWM, oltre che componenti alle sue frequenze multiple e interarmoniche. Un'ulteriore difficoltà nello studio del comportamento degli interruttori differenziali è dovuta al fatto che l'ampiezza delle correnti alla frequenza del motore e alla frequenza della modulazione PWM varia in funzione della velocità del motore: per una frequenza di esercizio pari a 50 Hz l'ampiezza della componente a 50 Hz è superiore a quella della componente alla frequenza della modulazione PWM, per frequenze del motore basse si ha invece la situazione opposta. Questo lato sarà approfondito in seguito.

Al fine di studiare l'influenza delle armoniche sul comportamento dell'interruttore differenziale sono stati condotti numerosi studi di cui si riportano qui i risultati. I progetti sono stati eseguiti per mezzo di simulazioni basate su alcune semplificazioni riguardo il modello utilizzato, si assume infatti che:

- La corrente di guasto sia composta dalla componente fondamentale e da una sola componente a frequenza maggiore;
- La corrente che circola nella bobina del circuito secondario del trasformatore differenziale abbia la stessa forma d'onda della corrente di guasto verso terra;
- I valori efficaci della corrente sinusoidale e della corrente distorta restino costanti.

Durante la seguente analisi saranno inoltre trascurati gli effetti dovuti alla saturazione e l'influenza sul ciclo di isteresi delle alte frequenze.

La corrente che circola nella bobina del relè elettromagnetico può essere descritta con la seguente equazione:



$$i_{s\Delta}(t) = \sqrt{2}I_{s\Delta}[\sin(\omega t + \alpha_1) + A_3 \sin(3\omega t + \alpha_3) + A_5 \sin(5\omega t + \alpha_5) + \dots + A_n \sin(n\omega t + \alpha_n)]$$

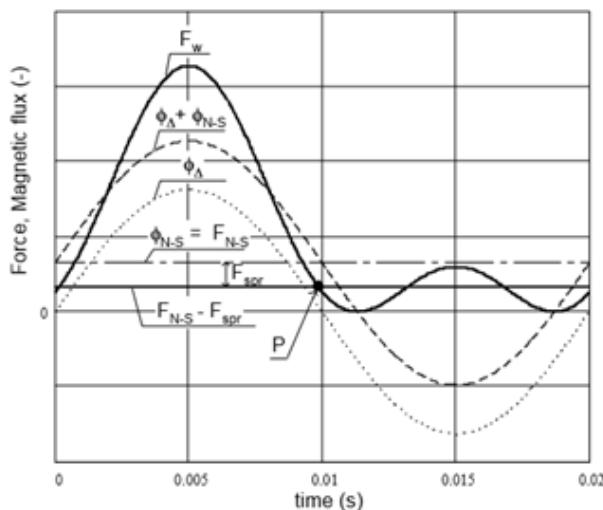
dove:  $A_3, A_5, \dots, A_n$ : ampiezza della 3<sup>a</sup>, 5<sup>a</sup>, ..., n-esima armonica

$\alpha_3, \alpha_5, \dots, \alpha_n$ : angolo di fase della 3<sup>a</sup>, 5<sup>a</sup>, ..., n-esima armonica

Si vedano allora gli effetti della presenza di componenti armoniche.

### 2.4.1 IMPATTO DELLA 3<sup>a</sup> ARMONICA

Si è già descritto il principio di funzionamento di un interruttore differenziale: quando la corrente differenziale che interessa il toroide del dispositivo supera un valore di soglia, nell'avvolgimento secondario si induce una corrente che genera un flusso magnetico il quale si somma al flusso prodotto dal magnete permanente, la cui forza mantiene ferma l'ancora. Se il flusso dovuto alla corrente differenziale in un primo momento aumenta la forza magnetica applicata sull'ancora, durante la seconda semionda la forza magnetica complessiva diventa inferiore a quella prodotta dal solo magnete permanente, e dunque la forza di attrazione che la molla esercita sull'ancora diventa maggiore, provocando di conseguenza l'apertura dei contatti. La relazione tra gli elementi descritti è mostrata nella seguente figura:



**Fig. 20:** Flussi magnetici e forze magnetiche nel relè dell'interruttore differenziale in caso di corrente di guasto verso terra alternata a 50 Hz.

- $F_w$ : forza risultante
- $\Phi_A$ : flusso magnetico dovuto alla corrente di guasto
- $\Phi_{N-S}$ : flusso magnetico generato dal magnete permanente
- $F_{N-S}$ : forza magnetica dovuta al magnete permanente
- $F_{spr}$ : forza applicata dalla molla
- P: punto di intervento dell'interruttore

In Fig. 20 è mostrato il comportamento di un interruttore differenziale quando la corrente differenziale ha un andamento sinusoidale puro a 50 Hz, ossia alla frequenza nominale. Essendo alle condizioni nominali, è questo l'andamento con cui fare il confronto durante lo studio dell'influenza delle armoniche. Da notare il punto P, che indica l'intervento dell'interruttore differenziale:

esso è in corrispondenza dell'intersezione tra la forza magnetica risultante  $F_w$ , applicata dal flusso totale somma del flusso generato dal magnete permanente e flusso generato dalla corrente circolante nella seconda bobina, e la linea di equilibrio, data dalla differenza tra forza generata dal flusso magnetico  $F_{N-S}$  e forza di attrazione esercitata dalla molla  $F_{spr}$ .

Si considera allora una corrente differenziale composta dalla componente fondamentale a 50 Hz e una componente armonica del terzo ordine. Si considereranno due diversi angoli di fase per vederne l'influenza, ed essendo la terza armonica quella che contribuisce maggiormente sul comportamento dell'interruttore, si considereranno anche diverse ampiezze.

Nella bobina si ha perciò una corrente pari a  $i_{S\Delta} = \sqrt{2}I_{S\Delta}[\sin\omega t + A_3 \sin(\omega t + \alpha_3)]$

Si vedano allora i risultati ottenuti considerando  $A_3 = 0,1$  e  $\alpha_3 = 0^\circ$  (Fig. 21a) e  $\alpha_3 = 180^\circ$  (Fig. 21b):

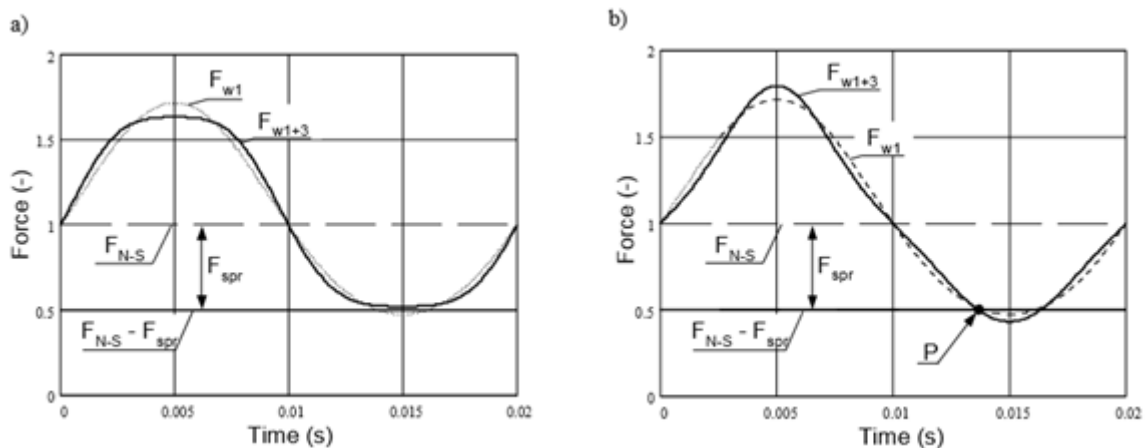


Fig. 21: Forze magnetiche (in p. u.) nel relè con una corrente differenziale composta da componente fondamentale e terza armonica, con  $A_3=0,1$ ; a)  $\alpha_3=0^\circ$ , b)  $\alpha_3=180^\circ$

Osservando Fig. 21 è possibile notare che la presenza della terza armonica può diminuire (Fig. 21a) o aumentare (Fig. 21b) la sensibilità del dispositivo. Nel caso di  $\alpha_3 = 0^\circ$  non si ha l'intervento del dispositivo in quanto la forza risultante  $F_{w1+3}$  risulta sempre maggiore rispetto alla linea di equilibrio ( $F_{N-S} - F_{spr}$ ). Ne consegue che, affinché l'interruttore intervenga, la corrente differenziale deve avere un valore maggiore rispetto a quando ha un andamento sinusoidale puro. Quando invece la terza armonica è sfasata rispetto alla fondamentale di un  $\alpha_3 = 180^\circ$  si può notare un leggero aumento della sensibilità del dispositivo, per cui si ha un intervento in corrispondenza di un valore minore di corrente differenziale: un intervento precoce.

Si considera ora un'ampiezza maggiore della terza armonica:  $A_3 = 0,5$ .

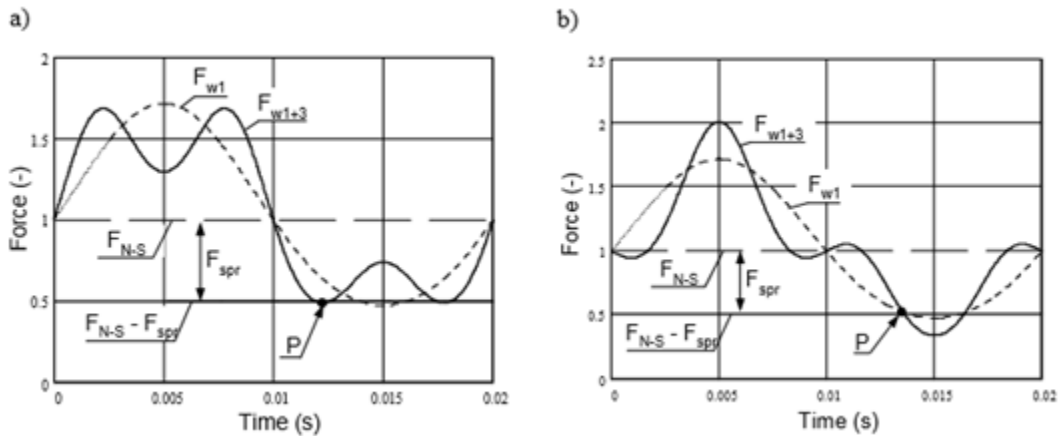


Fig. 22: Forze magnetiche (in p. u.) nel relè con una corrente differenziale composta da componente fondamentale e terza armonica, con  $A_3=0,5$ ; a)  $\alpha_3=0^\circ$ , b)  $\alpha_3=180^\circ$

È possibile notare che l'aumento dell'ampiezza della terza armonica influenza significativamente l'andamento della forza risultante  $F_{w1+3}$ , portando anche con un angolo di fase  $\alpha_3 = 0^\circ$  all'intervento del dispositivo differenziale, con evidente anticipo.

## 2.4.2 IMPATTO DELLE 23<sup>a</sup> E 49<sup>a</sup> ARMONICA

Per lo studio dell'influenza di armoniche di ordine elevato si è scelta l'armonica del 23° ordine. Si considera perciò una corrente differenziale composta dalla componente fondamentale a 50 Hz e dalla componente armonica del 23° ordine, avente ampiezza  $A_{23} = 0,1$  e angolo di fase  $\alpha_{23} = 0^\circ$  (Fig. 23a) o  $\alpha_{23} = 180^\circ$  (Fig. 23b).

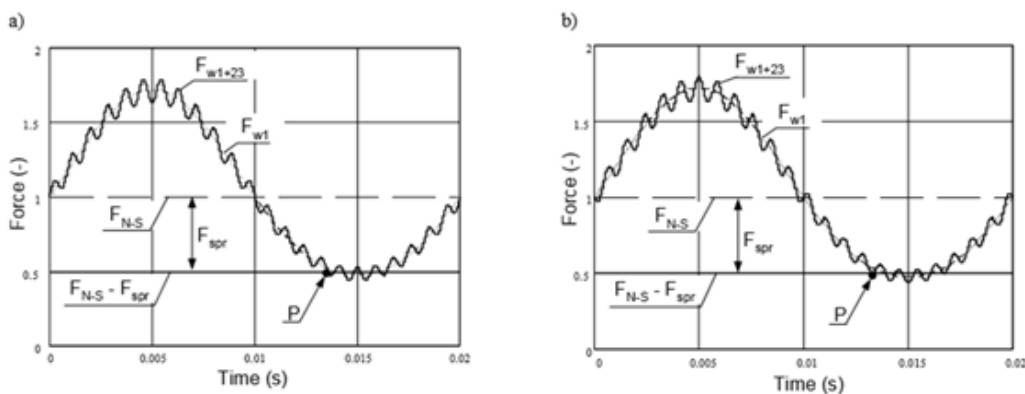


Fig. 23: Forze magnetiche (in p. u.) nel relè con una corrente differenziale composta da componente fondamentale e 23<sup>a</sup> armonica, con  $A_{23}=0,1$ ; a)  $\alpha_{23}=0^\circ$ , b)  $\alpha_{23}=180^\circ$

È possibile notare che nel caso di 23<sup>a</sup> armonica l'angolo di fase non è significativamente influente sull'intervento del dispositivo: in entrambi i casi mostrati in Fig. 23 l'intervento si ha in corrispondenza dello stesso valore di corrente di guasto verso terra. Si può però osservare un significativo apporto all'andamento della forza risultante  $F_{w1+23}$ , che comporta in entrambi i casi una diminuzione della sensibilità del dispositivo. Questo è legato al fatto che alte frequenze modificano il comportamento del trasformatore di corrente, l'impedenza dell'avvolgimento secondario e il relè elettromagnetico, oltre ad estendere il ciclo di isteresi, come sarà illustrato in seguito.

Confrontando il comportamento dell'interruttore in presenza della 3<sup>a</sup> armonica ed in presenza della 23<sup>a</sup> armonica con ampiezza  $A_3 = A_{23} = 0,1$  è lecito pensare che per correnti di guasto verso terra contenenti armoniche di basso ordine si ha una diminuzione o un aumento della corrente di intervento in funzione dell'angolo di fase delle armoniche rispetto alla fondamentale, mentre per correnti con componenti armoniche di ordine elevato la corrente di intervento può cambiare diverse volte indipendentemente dallo sfasamento delle armoniche rispetto alla fondamentale. A supporto di questa tesi si può considerare la 49<sup>a</sup> armonica: con  $A_{49} = 0,1$  e angolo di fase  $\alpha_{49} = 0^\circ$  (Fig. 24a) o  $\alpha_{49} = 180^\circ$  (Fig. 24b) si ottengono risultati del tutto simili a quelli ottenuti con la 23<sup>a</sup> armonica:

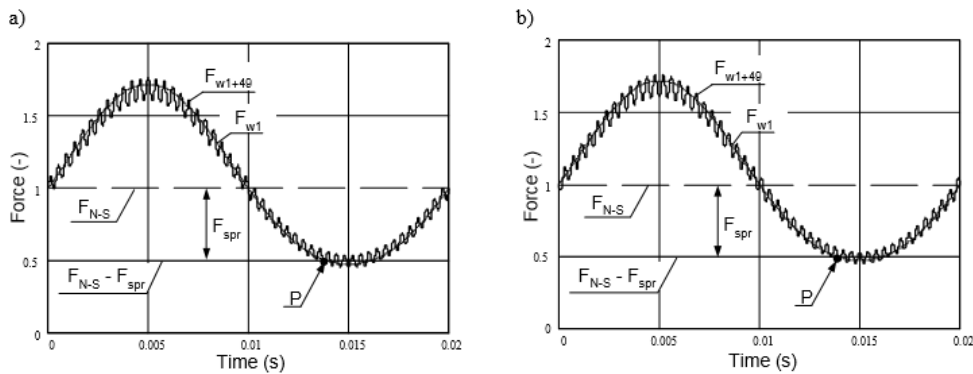


Fig. 24: Forze magnetiche (in p. u.) nel relè con una corrente differenziale composta da componente fondamentale e 49<sup>a</sup> armonica, con  $A_{49}=0,1$ ; a)  $\alpha_{49}=0^\circ$ , b)  $\alpha_{49}=180^\circ$

### 2.4.3 TEST DI LABORATORIO

Per verificare i risultati delle simulazioni appena visti sono stati testati numerosi interruttori differenziali a diversa corrente differenziale di intervento nominale  $I_{\Delta n} = 30, 100$  e  $300$  mA di diverso tipo (bipolo e quadripolo, tipo AC, A e B, senza ritardo all'intervento intenzionale). Per il test è stato utilizzato un generatore di corrente il quale ha erogato una corrente verso terra com-

posta dalla componente fondamentale e da una singola armonica dal 3° al 50° ordine. L'angolo di fase della corrente di guasto verso terra varia a step di 45° e si è variata l'ampiezza delle componenti (indicate in Fig. 25 con la percentuale riferita all'ampiezza della fondamentale). I risultati hanno confermato quanto mostrato dalle simulazioni, si riportano di seguito quelli relativi alle armoniche scelte nelle simulazioni per un interruttore del tipo AC da 30 mA:

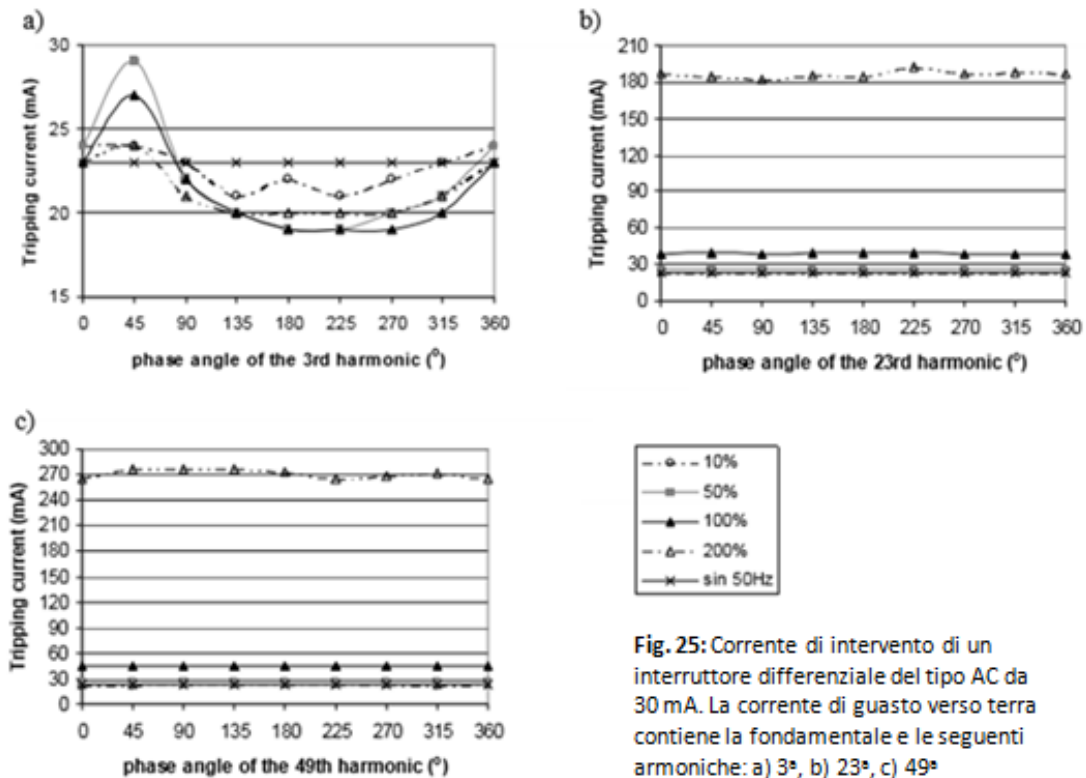


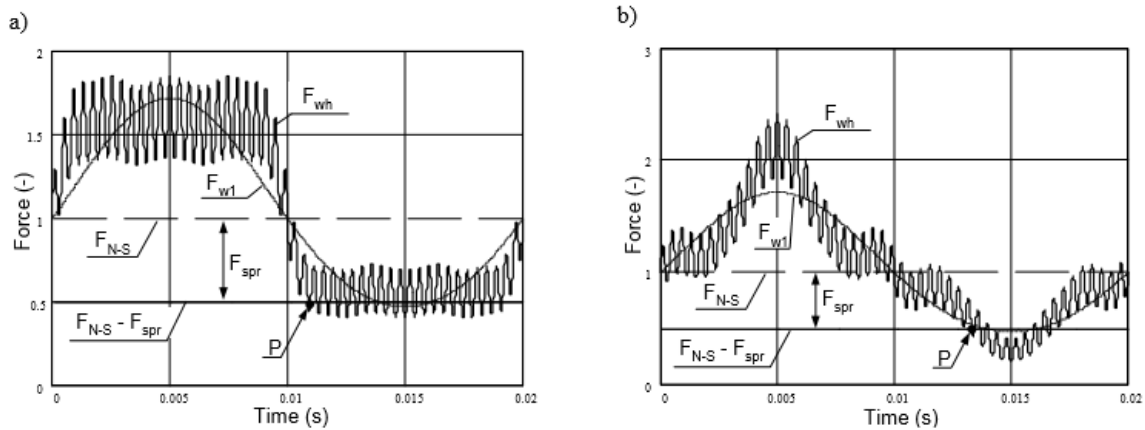
Fig. 25: Corrente di intervento di un interruttore differenziale del tipo AC da 30 mA. La corrente di guasto verso terra contiene la fondamentale e le seguenti armoniche: a) 3<sup>a</sup>, b) 23<sup>a</sup>, c) 49<sup>a</sup>

Si può vedere infatti che il valore della corrente di intervento in presenza della terza armonica è fortemente dipendente dall'angolo di fase dell'armonica stessa. Si può anche notare che per quanto la variazione della partecipazione influenzi il valore della corrente di intervento, questa resta sempre nell'intervallo  $[0,5 I_{\Delta n} ; I_{\Delta n}]$ , per cui non si hanno interventi intempestivi. Non si può fare lo stesso discorso nel caso di corrente di guasto verso terra contenente 23<sup>a</sup> o 49<sup>a</sup> armonica, per le quali si può vedere in Fig. 25b e Fig. 25c che per una partecipazione del 100% e del 200% la corrente di intervento è molto maggiore rispetto a quella nominale, addirittura in corrispondenza di una partecipazione del 200% della 49<sup>a</sup> armonica la corrente di intervento cresce di 12 volte (da 23 mA a 276 mA). Questa forte diminuzione della sensibilità dell'interruttore differenziale rende inefficace la protezione.

L'andamento riportato è quello più critico: gli interruttori A e B testati non raggiungono valori di corrente di intervento elevati quanto quelli mostrati dall'interruttore del tipo AC. Tuttavia il discorso riguardo l'efficacia è estendibile anche ai suddetti tipi: entrambi presentano corretto funzionamento in presenza della sola terza armonica per ogni valore di partecipazione e per ogni valore di angolo di fase  $\alpha_3$ , ma in presenza della 23<sup>a</sup> o 49<sup>a</sup> armonica presentano correnti di intervento superiori a 30 mA in corrispondenza di partecipazioni del 100% e del 200%, perdendo così la funzione di protezione.

#### 2.4.4 IMPATTO DI DIVERSE ARMONICHE

Finora sono state considerate correnti con due sole componenti: la fondamentale ed un'armonica. Nella pratica però una corrente di guasto verso terra comprende un ampio spettro di armoniche. Nello studio appena presentato è stato dunque simulato anche il funzionamento di un interruttore differenziale in presenza simultanea delle 3<sup>a</sup>, 5<sup>a</sup>, 7<sup>a</sup>, 9<sup>a</sup>, 11<sup>a</sup> e 49<sup>a</sup> armonica. Mantenendo gli stessi valori efficaci delle correnti, si è variato il solo angolo di fase della terza armonica:  $\alpha_3 = 0^\circ$  (Fig. 26a) e  $\alpha_3 = 180^\circ$  (Fig. 26b), ottenendo i seguenti andamenti:



**Fig. 26:** Forze magnetiche (in p. u.) nel relè con una corrente differenziale composta dalla fondamentale e le seguenti armoniche:  
 $A_3=0.3, A_5=0.15, A_7=0.005, A_9=0.05, A_{11}=0.02, A_{49}=0.3$ ;  
 $\alpha_3=$  a)  $0^\circ$ , b)  $180^\circ, \alpha_5=0^\circ, \alpha_7=0^\circ, \alpha_9=0^\circ, \alpha_{11}=0^\circ, \alpha_{49}=0^\circ$

Si può notare che la sola variazione dell'angolo di fase della terza armonica varia drasticamente il valore di picco della corrente. Mentre per  $\alpha_3 = 0^\circ$  si ha una forma d'onda "flat" (Fig. 26a), per  $\alpha_3 = 180^\circ$  si ottiene una forma d'onda "peaky" (Fig. 26b), a cui corrisponde un valore efficace della corrente di guasto inferiore rispetto alla corrente di guasto quando si ha forma d'onda flat.

Per descrivere se la forma d'onda è *peaky* o *flat* viene utilizzato il Fattore di cresta CF, dato dal rapporto tra valore di picco e valore efficace della corrente:

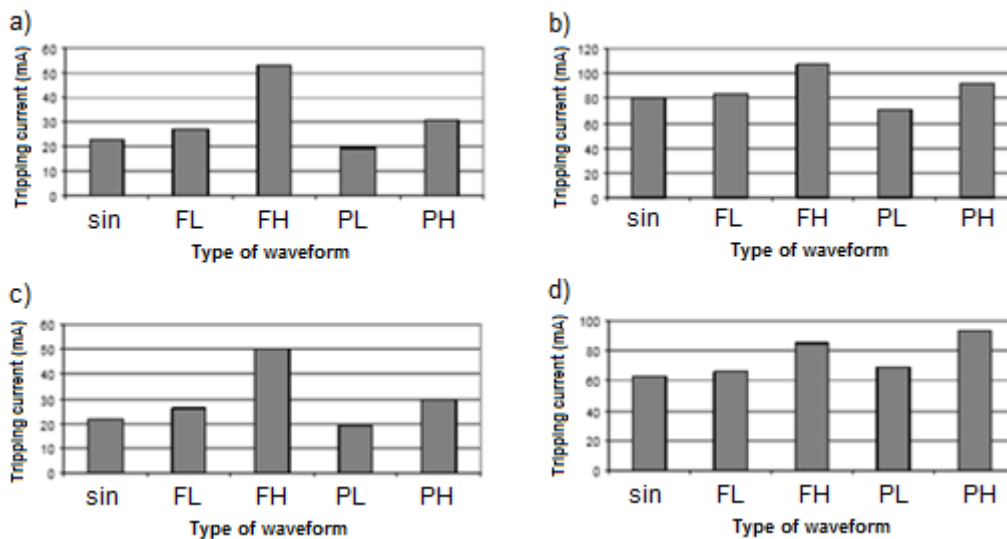
$$CF = \frac{I_{MAX}}{I_{rms}}$$

Per una corrente continua tale fattore è unitario, per una sinusoidale pura vale 1,414.

Sono stati eseguiti alcuni test con correnti aventi forma d'onda *flat* e correnti aventi forma d'onda *peaky* sugli stessi dispositivi per valutare in modo qualitativo la differenza tra i valori delle correnti di intervento in relazione alla forma d'onda. Sono state considerate le seguenti forme d'onda:

- FL: *flat*, con armonica di ordine elevato avente piccola ampiezza ( $A_{49} = 0.3, \alpha_{49} = 0^\circ$ );
- FH: *flat*, con armonica di ordine elevato avente grande ampiezza ( $A_{49} = 1, \alpha_{49} = 0^\circ$ );
- PL: *peaky*, con armonica di ordine elevato avente piccola ampiezza ( $A_{49} = 0.3, \alpha_{49} = 0^\circ$ );
- PH: *peaky*, con armonica di ordine elevato avente grande ampiezza ( $A_{49} = 1, \alpha_{49} = 0^\circ$ ).

I risultati ottenuti sono di seguito presentati:



**Fig. 27:** Correnti di intervento per diversi tipi di corrente: a) tipo AC, 30 mA senza ritardo; b) tipo AC, 100 mA con ritardo; c) tipo A, 30 mA senza ritardo; d) tipo A, 100 mA con ritardo

Osservando Fig. 27 si può vedere che la forma d'onda della corrente influenza significativamente il valore della corrente di intervento: se la forma d'onda è *peaky* si ha un aumento della sensibilità del dispositivo nel caso in cui l'ampiezza della 49<sup>a</sup> armonica sia contenuta, senza causare inter-

venti intempestivi in quanto il valore della corrente di intervento rientra nell'intervallo stabilito dalla Norma CEI EN 61008-1 in tutti e quattro i casi illustrati. Quando l'ampiezza della 49<sup>a</sup> armonica è elevata si ha invece una diminuzione della sensibilità, ma viene comunque rispettato l'intervallo di valori di corrente per cui è richiesto l'intervento. Le correnti *flat* possono invece creare problemi: si nota infatti che, escludendo il dispositivo del tipo A con ritardo all'intervento, quando tale corrente presenta un'elevata ampiezza dell'armonica del 49° ordine si ha una corrente di intervento molto superiore rispetto a quella che si ha per una corrente sinusoidale pura, e superiore anche al valore nominale.

Si nota comunque che, ad esclusione del dispositivo di tipo A con  $I_{\Delta n} = 100$  mA e con ritardo programmato all'intervento, per correnti *flat* si hanno valori di corrente di intervento maggiori rispetto a quelli che si hanno per correnti *peaky*.

## **2.5 IMPATTO DELLA VELOCITÀ DEL MOTORE E DELLA FREQUENZA DI MODULAZIONE PWM**

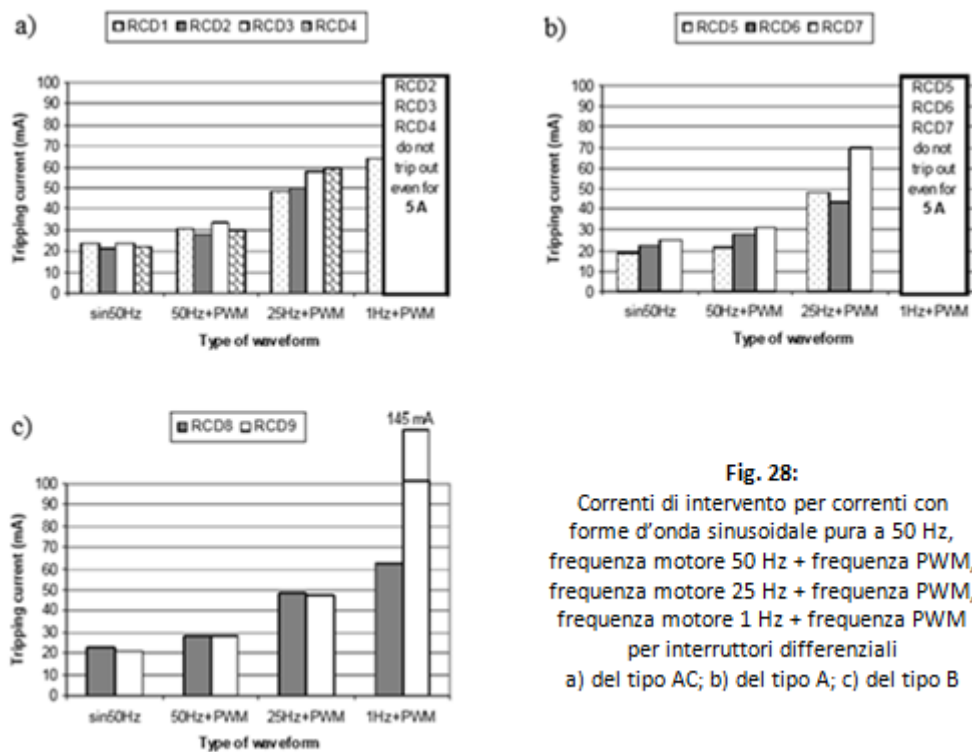
È già stato accennato che la corrente di guasto presenta componenti la cui frequenza è legata alla velocità del motore e alla frequenza di modulazione PWM. Per analizzare come questi due fattori influenzano l'intervento dei dispositivi differenziali sono stati condotti studi i cui risultati sono di seguito presentati ed analizzati.

Si consideri allora un guasto verso terra nei morsetti di uscita del convertitore di frequenza per diverse velocità del motore, mantenendo la frequenza di modulazione PWM costante al valore di 1 kHz. Vengono testati interruttori differenziali del tipo AC, A e B, con una corrente differenziale di intervento nominale di 30 mA. Per ogni tipo si testano diversi campioni, ai quali vengono applicate correnti puramente sinusoidali a 50 Hz (quando cioè si considera una frequenza del motore nominale trascurando distorsioni) per verificarne il corretto funzionamento, e correnti comprendenti le componenti di distorsione dovute alla modulazione PWM e con velocità del motore decrescente (50 Hz, 25 Hz, 1 Hz). In Fig. 28 sono mostrate le correnti di intervento rilevate durante l'esperimento.

Mentre tutti i dispositivi presentano corretto funzionamento in corrispondenza di correnti puramente sinusoidali in quanto intervengono all'interno dell'intervallo [15 mA ; 30 mA], è possibile



notare che solo gli interruttori differenziali del tipo B presentano corretto funzionamento a frequenza di funzionamento nominale 50 Hz con distorsioni: sia gli interruttori del tipo AC che del tipo A presentano alcuni campioni (RCD1, RCD3 ed RCD7) la cui corrente di intervento è superiore a 30 mA. Per frequenze del motore inferiori a quella nominale nessun dispositivo interviene per la corrente differenziale nominale: in corrispondenza di una frequenza motore di 25 Hz l'interruttore differenziale del tipo A RCD7 ha una corrente di intervento che è oltre il doppio del valore nominale di intervento. Per bassissime frequenze motore (1 Hz), si può notare che diversi dispositivi non intervengono per correnti del valore efficace di 5 A. Solo l'interruttore del tipo B garantisce l'intervento in presenza di frequenza motore di 1 Hz, ma l'intervento avviene per una corrente pari a 145 mA, oltre 7 volte superiore alla corrente di intervento per una corrente sinusoidale pura a 50 Hz.

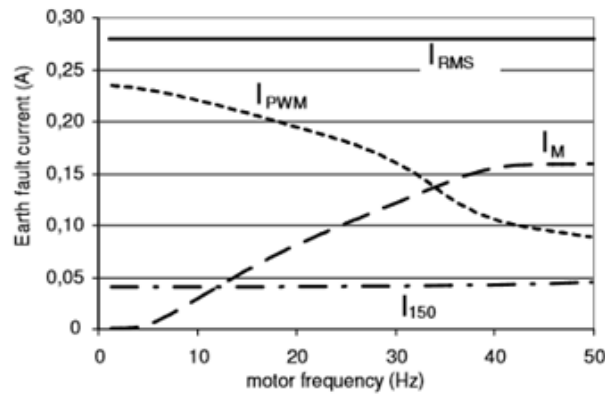


**Fig. 28:**  
Correnti di intervento per correnti con forme d'onda sinusoidale pura a 50 Hz, frequenza motore 50 Hz + frequenza PWM, frequenza motore 25 Hz + frequenza PWM, frequenza motore 1 Hz + frequenza PWM per interruttori differenziali a) del tipo AC; b) del tipo A; c) del tipo B

È stato perciò dimostrato che basse velocità di motore influiscono negativamente sul comportamento dei dispositivi differenziali in quanto ne aumentano la corrente di innesco: questi non possono dunque garantire protezione per basse velocità di motore.

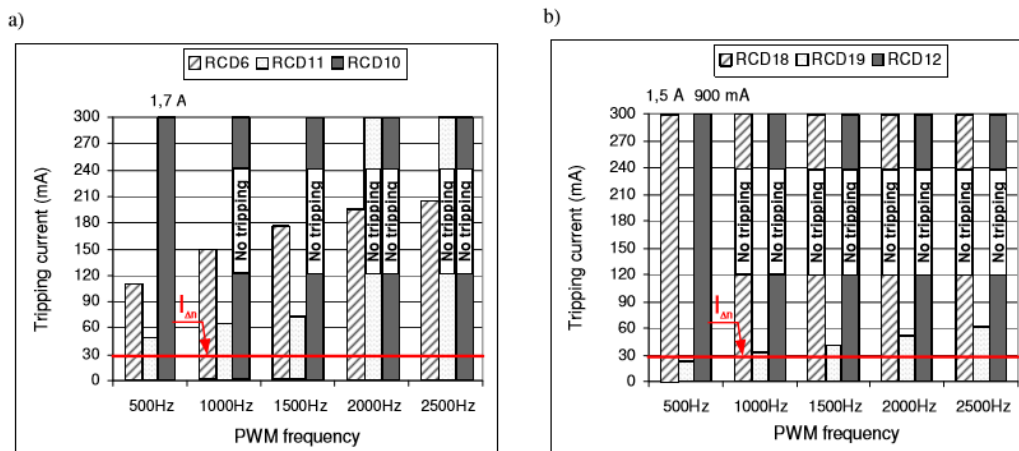
Precedentemente si era accennato al fatto che per basse velocità l'ampiezza delle correnti alla frequenza della modulazione PWM è di molto superiore a quella delle altre componenti della

corrente di guasto verso terra. In Fig. 29 si può osservare la variazione della corrente di guasto in funzione della velocità del motore: si nota che se il motore ha una frequenza inferiore o uguale a 33 Hz, la componente a frequenza della modulazione PWM  $I_{PWM}$  supera in ampiezza la componente alla frequenza del motore  $I_M$ .

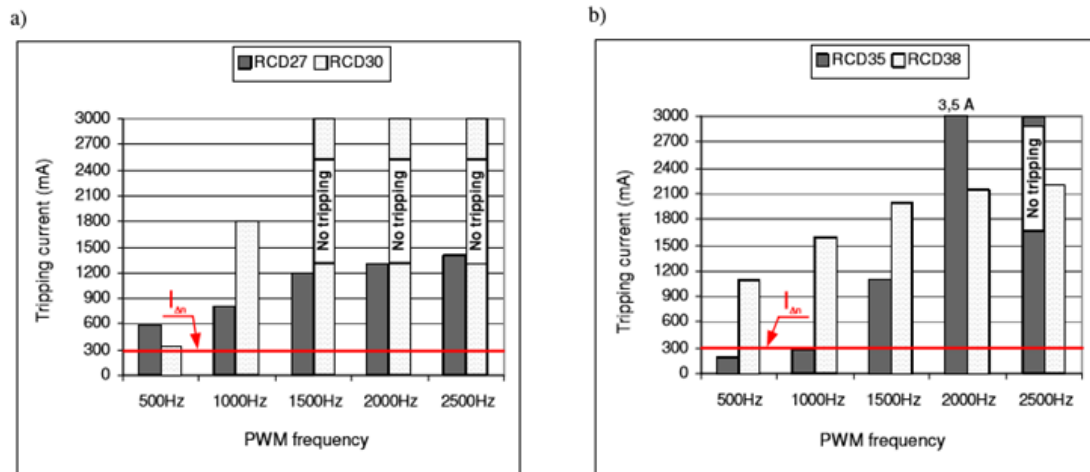


**Fig. 29:** Variazione della corrente di guasto verso terra in funzione della frequenza del motore.  
 $I_{RMS}$ : valore efficace della corrente totale;  $I_{PWM}$  componente alla frequenza PWM;  
 $I_M$ : componente alla frequenza motore;  $I_{150}$ : terza armonica

Si analizza dunque l’impatto della frequenza della modulazione PWM sul comportamento dell’interruttore differenziale. Poiché, com’è ben visibile da Fig. 29, più è bassa la velocità del motore e maggiore è l’ampiezza della componente di corrente alla frequenza della modulazione PWM, si esegue una simulazione del comportamento di diversi interruttori differenziali al variare della frequenza PWM mantenendo la frequenza del motore costante al valore di 1 Hz. L’esperienza viene condotta su vari dispositivi di tipo AC ed A con  $I_{\Delta n} = 30$  mA (Fig. 30) e su dispositivi di tipo AC ed A con  $I_{\Delta n} = 300$  mA (Fig. 31):



**Fig. 30:** Corrente di intervento al variare della frequenza PWM per interruttori differenziali:  
a) tipo AC, 30 mA; b) tipo A, 30 mA



**Fig. 31:** Corrente di intervento al variare della frequenza PWM per interruttori differenziali:  
a) tipo AC, 300 mA; b) tipo A, 300 mA

Confrontando le correnti di intervento ai vari valori di frequenza della modulazione PWM si può affermare che più questa frequenza è alta e maggiore è la corrente di intervento. I dispositivi provati hanno gli stessi dati di targa, ma è possibile notare differenze significative sui valori di corrente: per quanto riguarda il gruppo di interruttori con corrente di intervento nominale di 30 mA si nota che solo il dispositivo contrassegnato con RCD6 interviene sempre, seppur in corrispondenza di correnti più alte di 30 mA. Dei dispositivi testati, l'unico che presenta un corretto funzionamento è l'RCD36, che riesce a garantire una protezione per frequenze di modulazione PWM fino a 1000 Hz (con frequenza del motore di 1 Hz).

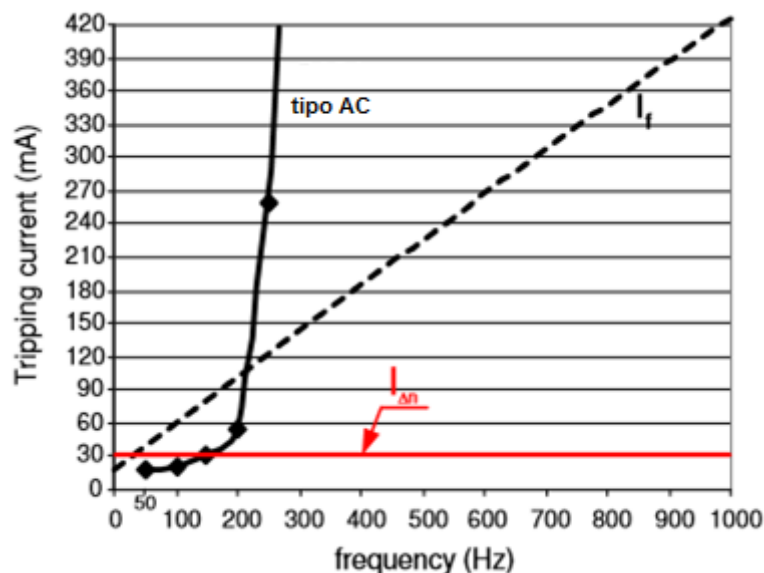
Va comunque specificato che si sono considerati i casi più sfavorevoli: infatti, come mostrato precedentemente, i dispositivi differenziali presentano correnti di innesco più elevate con la diminuzione della velocità del motore; ne consegue che considerare come frequenza del motore una frequenza pari a 1 Hz può essere visto come un caso limite. Inoltre non si è tenuto conto di quanto stabilisce la Norma IEC 640479-1 in relazione alla frequenza della corrente di guasto verso terra ed effetti della corrente sul corpo umano: soglia di percezione, soglia di contrazione muscolare e soglia di fibrillazione ventricolare crescono con l'aumentare della frequenza. È quindi indicato verificare la protezione dei dispositivi differenziali al variare della frequenza per diverse velocità del motore e tenendo conto della curva di sicurezza.

La valutazione del limite di fibrillazione ventricolare è relativamente semplice per correnti puramente sinusoidali, indipendentemente dalla loro frequenza. Per correnti distorte è invece possibile eseguire solo una stima approssimativa del rischio di fibrillazione ventricolare: si può con-

siderare come se fosse equivalente al rischio dovuto a una corrente sinusoidale la cui componente fondamentale  $I_f$  è equivalente alla radice della somma del quadrato del rapporto tra l'ampiezza  $I_h$  dell'h-esima componente ed il relativo Fattore di frequenza  $F_f$ :

$$I_f = \sqrt{\sum_{h=1}^n \left( \frac{I_h}{F_{fh}} \right)^2}$$

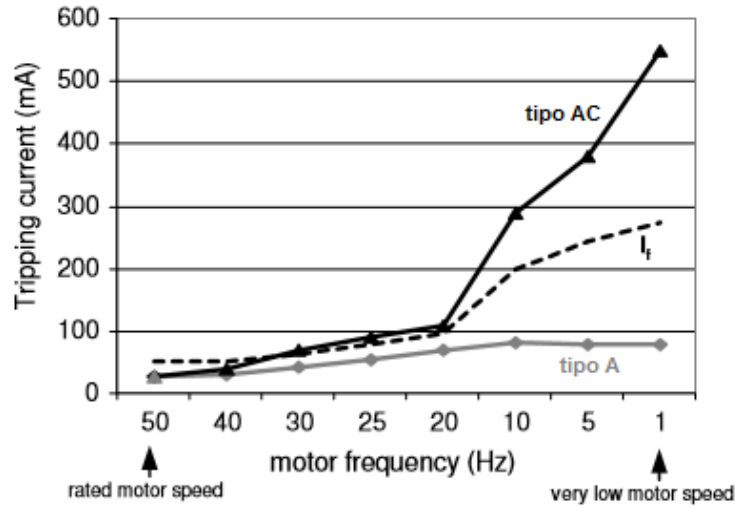
Si considera allora il comportamento di un interruttore del tipo AC con  $I_{\Delta n} = 30$  mA al variare della frequenza della corrente di guasto verso terra (Fig. 32) e il comportamento degli interruttori del tipo AC e del tipo A con entrambi  $I_{\Delta n} = 30$  mA al variare della frequenza del motore (Fig. 33), confrontandone le correnti di intervento con la curva della soglia di fibrillazione ventricolare ottenuta come sopra descritto.



**Fig. 32:** Corrente di intervento di un dispositivo del tipo AC da 30 mA al variare della frequenza di funzionamento.  
 Linea continua: caratteristica del dispositivo, Linea rossa: corrente differenziale nominale del dispositivo,  
 Linea tratteggiata: curva limite della fibrillazione ventricolare

Gli andamenti rispecchiano quanto si era già dedotto: in Fig. 32 si può osservare che la corrente di innesco del dispositivo cresce con l'aumentare della frequenza ma, poiché col crescere della frequenza cresce anche la soglia di fibrillazione ventricolare, il dispositivo può garantire protezione fino ad una frequenza di esercizio di 200 Hz nonostante intervenga per valori di corrente superiori al valore nominale. In Fig. 33 si nota una crescita del valore di corrente che determina la soglia di fibrillazione ventricolare al diminuire della velocità del motore, e dunque il dispositivo del tipo A

con  $I_{\Delta n} = 30$  mA presenta una protezione efficace per tutto l'intervallo di frequenza considerato. L'interruttore differenziale del tipo AC si rivela invece inefficace già per la frequenza di 30 Hz.



**Fig. 33:** Corrente di intervento al variare della frequenza del motore per una frequenza PWM pari a 3.3 kHz.  
 Linea continua grigia: caratteristica del dispositivo di tipo A da 30 mA,  
 Linea continua nera: caratteristica del dispositivo di tipo AC da 30 mA,  
 Linea tratteggiata: curva limite della fibrillazione ventricolare

Al fine di garantire la protezione sarebbe quindi necessario evitare il funzionamento a basse velocità per i motori e utilizzare frequenze di modulazione PWM non elevate. Ciò però comporterebbe un peggioramento della modulazione dei motori, infatti si tende a utilizzare elevate frequenze PWM, dunque la riduzione di tale frequenza non è una soluzione accettabile.

Dalle problematiche esposte nasce la necessità di conoscere in fase di progettazione le caratteristiche dell'ambiente in cui dovrà operare l'interruttore differenziale e testare il funzionamento di tali dispositivi per ampi range di frequenze della corrente che lo interessa. Le norme a cui si deve fare riferimento per la trattazione degli interruttori differenziali prescrivono numerose prove che i costruttori devono eseguire per testare la validità del dispositivo, se ne parlerà in un secondo momento.

## 2.6 EFFETTI DELLA SATURAZIONE, MAGNETIZZAZIONE E PERDITE NEL NUCLEO

È stato più volte evidenziato che durante le simulazioni effettuate negli studi finora presentati sono stati trascurati, per semplificarne la trattazione, gli aspetti “fisici” degli interruttori

differenziali, quali ad esempio gli effetti della saturazione. Si vedano allora nello specifico quali effetti sono stati trascurati e le loro caratteristiche.

### 2.6.1 EFFETTI DELLA SATURAZIONE DEL NUCLEO

Durante gli studi illustrati si è sempre dato per scontato che la corrente circolante nell'avvolgimento secondario avvolto sul toroide sia attraversato da una corrente con forma d'onda identica a quella della corrente di dispersione; supporre che la corrente circolante nell'avvolgimento secondario del trasformatore differenziale abbia la stessa forma d'onda della corrente di guasto verso terra è equivalente ad aver supposto il trasformatore ideale. Quando si è confrontato l'intervento dell'interruttore differenziale in presenza di una corrente *peaky* o *flat* si è dedotto che in caso di corrente *peaky* si ha un intervento per correnti differenziali minori in valore efficace, e quindi un aumento della sensibilità del dispositivo. Tuttavia, correnti residue con elevato fattore di cresta CF, ossia correnti *peaky*, sono più inclini a spingere il nucleo nella zona di saturazione: in questa situazione la componente di picco nella corrente che circola nell'avvolgimento secondario, la quale produce la variazione di flusso che porta all'apertura dei contatti secondo la procedura descritta nel principio di funzionamento, potrebbe non produrre più una variazione addizionale del flusso e quindi della forza elettromotrice, come si può vedere nella seguente figura:

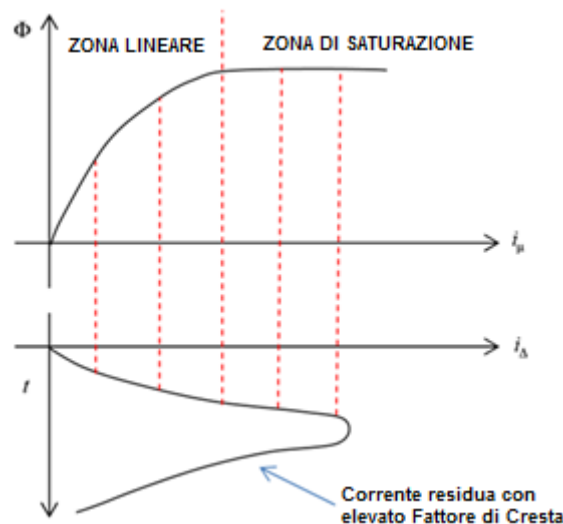


Fig. 34: Curva di saturazione della corrente differenziale

Ne consegue che tale componente non apporta un contributo alla forza magnetica totale che si oppone alla forza di attrazione esercitata dalla molla sull'ancora galleggiante; risulta quindi neces-

saria una corrente differenziale maggiore per portare all'apertura dei contatti in quanto occorre compensare la parte di corrente "persa" nella zona di saturazione.

Quando il trasformatore differenziale lavora in saturazione si ha allora una diminuzione della sensibilità dell'intervento, e questo è in contrasto con quanto visto precedentemente: era stato infatti ricavato che, in presenza di correnti *flat* e correnti *peaky*, gli interruttori differenziali intervengono con valori minori di corrente nel caso di correnti *peaky*. Si è tuttavia appena illustrato che tali forme d'onda di corrente presentano il rischio di saturazione comportando l'effetto discusso.

## 2.6.2 EFFETTI DELLA MAGNETIZZAZIONE E DELLE PERDITE NEL NUCLEO

Per studiare gli effetti della magnetizzazione e delle perdite nel nucleo risulta comodo servirsi del circuito equivalente di un interruttore differenziale:

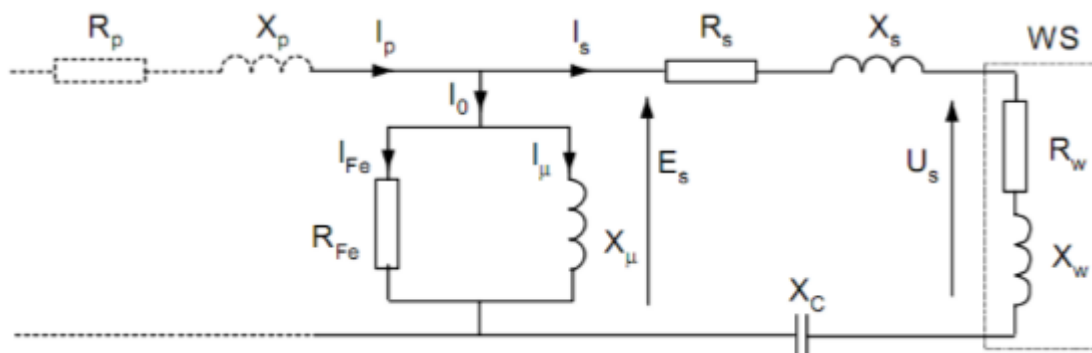


Fig. 35: Circuito equivalente di un interruttore differenziale:  $I_p$ : corrente residua,  $I_s$ : corrente nell'avvolgimento secondario,  $E_s$ : tensione indotta nell'avvolgimento secondario, WS: relè

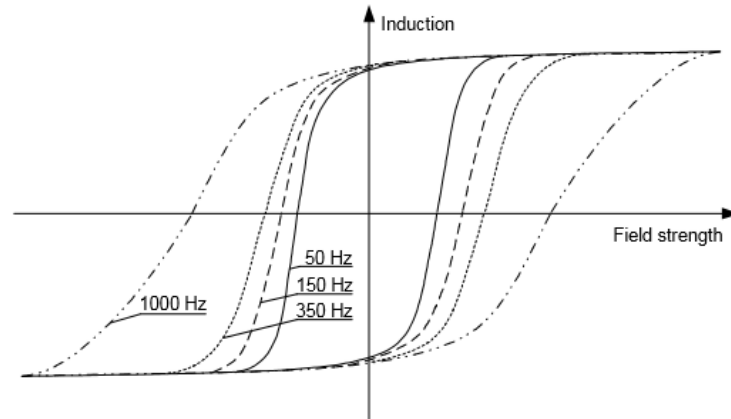
Parte della corrente del circuito primario del trasformatore differenziale, ossia la corrente verso terra, fluisce attraverso l'induttanza magnetica, quindi si produce una variazione di flusso e una forza elettromotrice. Per elevate frequenze è necessaria una corrente di magnetizzazione  $I_\mu$  inferiore per indurre nel circuito secondario una tensione pari a quella che si induce alla frequenza fondamentale, per via della seguente relazione:

$$\overline{E_s} = j\omega X_\mu \overline{I_\mu}$$

Di conseguenza la componente armonica della corrente residua, che ha alta frequenza, tende a generare una corrente al secondario più elevata con una corrente magnetizzante minore, perciò la

sensibilità all'intervento aumenta quando la corrente residua è composta da alcune componenti armoniche.

D'altro canto, come già accennato, per alte frequenze si ha un ciclo di isteresi più grande, come mostrato nella seguente figura:



**Fig. 36:** Variazione del ciclo di isteresi di un dispositivo del tipo AC in funzione della frequenza della corrente residua

Inoltre, le perdite per correnti parassite crescono per frequenze più alte. Ne risulta che le perdite nel nucleo ferromagnetico crescono per correnti residue contenenti armoniche, quindi la corrente che si induce nel circuito secondario è minore: è perciò necessaria una corrente verso terra maggiore per raggiungere il valore di corrente nel circuito secondario necessario ad aprire i contatti. Il risultato di questi meccanismi è perciò una diminuzione della sensibilità all'intervento del dispositivo.

Si riassumono nella seguente tabella gli effetti della saturazione, della magnetizzazione e delle perdite nel nucleo:

<b>Meccanismo</b>	<b>Fattore di causa</b>	<b>Effetto sulla sensibilità</b>
<i>Saturazione</i>	<i>Fattore di Cresta elevato</i>	<i>Negativo</i>
<i>Magnetizzazione</i>	<i>Armoniche di ordine elevato</i>	<i>Positivo</i>
<i>Perdite nel nucleo</i>	<i>Armoniche di ordine elevato</i>	<i>Negativo</i>

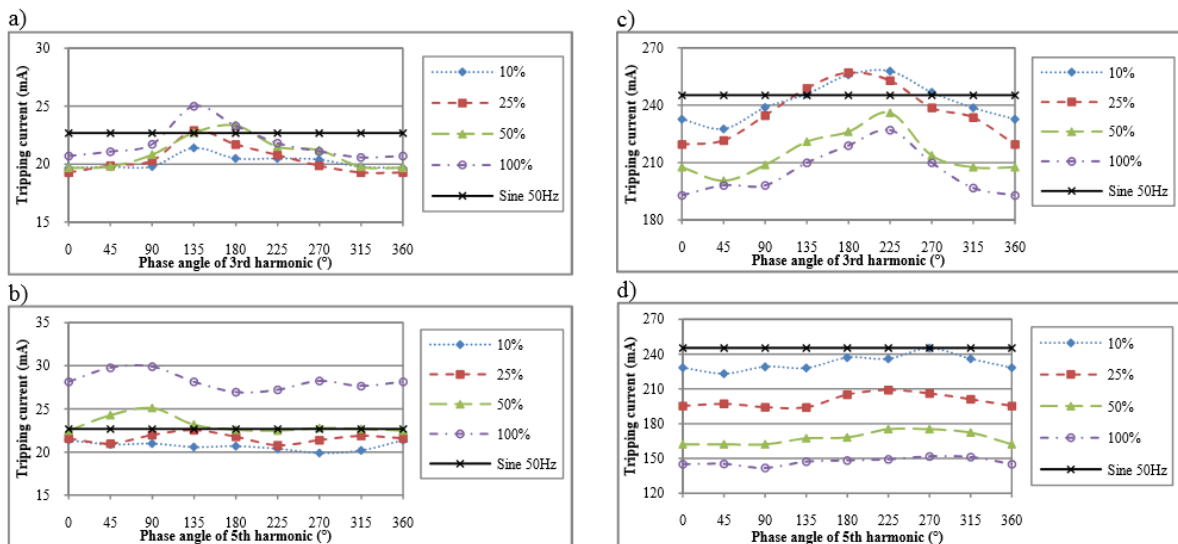
**Tab. 5:** Legame tra fattori che causano effetti "fisici" sul dispositivo e sensibilità all'intervento

Quando si è introdotto il Fattore di Cresta FC si è notato che sono principalmente le armoniche di basso ordine che influenzano la forma d'onda della corrente, rendendola *flat* o *peaky*. Si può però notare che la magnetizzazione del dispositivo e le perdite nel nucleo sono en-



trambe dominate dalle armoniche di ordine elevato presenti nella corrente verso terra, dando tuttavia l'effetto opposto: mentre la saturazione aumenta la sensibilità all'intervento, le perdite nel ferro la diminuiscono. Quindi, se da un lato la presenza di armoniche ad elevato ordine aumenta la sensibilità all'intervento, dall'altro la diminuisce. È allora necessario distinguere in quali circostanze un effetto è predominante rispetto agli altri. A tale scopo sono stati condotti esperimenti su diversi interruttori differenziali del tipo A per correnti contenenti diverse componenti armoniche.

Si è considerato un dispositivo del tipo A con  $I_{\Delta n} = 30$  mA ed uno con  $I_{\Delta n} = 300$  mA, applicando una corrente contenente la sola 3<sup>a</sup> armonica con ampiezza rispetto alla fondamentale di 0.10, 0.25, 0.50, 1.00, e una corrente componente la sola 5<sup>a</sup> armonica, anch'essa con ampiezza rispetto alla fondamentale di 0.10, 0.25, 0.50, 1.00. Si ottengono le seguenti correnti di intervento:



**Fig. 37:** Correnti di intervento con fondamentale + a) 3<sup>a</sup> armonica, b) 5<sup>a</sup> armonica per interruttore tipo A da 30 mA; fondamentale + c) 3<sup>a</sup> armonica, d) 5<sup>a</sup> armonica per interruttore tipo A da 300 mA

Osservando l'influenza della 3<sup>a</sup> armonica si può osservare, in Fig. 37a e Fig. 37c, che il valore massimo della corrente di intervento si trova presso 180° di sfasamento rispetto alla fondamentale: ciò prova l'effetto della saturazione, in quanto il Fattore di Cresta è maggiore anche per la 3<sup>a</sup> armonica. Osservando invece l'effetto della 5<sup>a</sup> armonica non è possibile stabilire un legame tra Fattore di Cresta e sensibilità dell'intervento: ciò significa che l'effetto della saturazione non predomina sull'influenza della sensibilità per armoniche del 5° ordine o superiori. Dall'influenza della 5<sup>a</sup> armonica si può inoltre osservare che per il dispositivo con  $I_{\Delta n} = 30$  mA, basse ampiezze dell'armonica (10% e 25%) comportano una corrente di intervento inferiore a quella che si ha per una corrente sinusoidale pura alla frequenza nominale: ne deriva che in queste condizioni è pre-

dominante l'effetto magnetizzante, che, come visto in precedenza, aumenta la sensibilità all'intervento dell'interruttore differenziale. In contrasto, per ampiezze della 5<sup>a</sup> armonica maggiori (50%, 100%), la corrente di intervento supera quella che si ha con una corrente sinusoidale pura a 50 Hz, per cui l'effetto delle perdite nel nucleo diventa qui predominante. Osservando però Fig. 37c e Fig. 37d, riguardanti l'interruttore con  $I_{\Delta n} = 300$  mA, si può notare che l'incremento dell'ampiezza delle armoniche comporta una diminuzione della corrente di intervento: di conseguenza è dominante l'effetto della magnetizzazione. A questo aspetto si può dare una spiegazione ipotizzando che i dispositivi con  $I_{\Delta n} = 300$  mA siano progettati meglio, e ciò rende irrilevanti le perdite nel nucleo per basse frequenze.

Per studiare la predominanza degli effetti in presenza di alte frequenze si è considerato un dispositivo del tipo A con corrente differenziale di intervento nominale pari a 30 mA, a cui viene applicata una corrente contenente la 23<sup>a</sup> armonica ed una contenente la 49<sup>a</sup> armonica. Come già illustrato, è lo sfasamento delle armoniche di basso ordine (in particolare del terzo ordine) che determina la forma d'onda della corrente, dunque lo studio per alte frequenze viene fatto considerando un angolo di fase delle armoniche di 0° (quindi sfasamento nullo rispetto alla fondamentale) e valutando la corrente di intervento in funzione dell'ampiezza di tali armoniche. Viene riportato nella figura sottostante l'andamento delle correnti di intervento per le due correnti suddette:

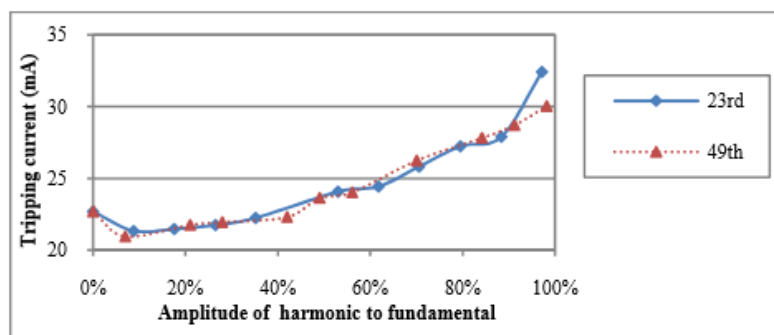


Fig. 38: Corrente di intervento di un dispositivo tipo A da 30 mA con corrente contenente 23<sup>a</sup> armonica e corrente contenente 49<sup>a</sup> armonica

Gli andamenti sono piuttosto simili: per basse ampiezze delle armoniche la corrente di intervento decresce, dunque domina l'effetto della magnetizzazione, ma già per ampiezze leggermente inferiori al 20% si può osservare una tendenza opposta, fino a raggiungere, per la corrente con l'armonica del 23° ordine, correnti di intervento superiori alla nominale per elevate ampiezze

delle armoniche. Ne deriva che più l'ampiezza delle armoniche ad elevata frequenza cresce, più le perdite nel nucleo si fanno dominanti.

Dalle analisi appena illustrate risulta ancor più evidente la difficoltà dello studio del comportamento degli interruttori differenziali: numerosi sono i fattori in gioco e non è tuttora possibile determinare con certezza un intervallo definito di condizioni in cui un effetto predomina sugli altri. Da questo punto di vista le norme non danno alcun aiuto: considerando infatti solo forme d'onda standard non prendono in considerazione la presenza di componenti armoniche con le conseguenze che portano.

## **2.7 SCATTI INTEMPESTIVI DOVUTI A SOVRATENSIONI**

Finora sono stati illustrati i motivi degli interventi intempestivi o mancati interventi degli interruttori differenziali legati alla distorsione della corrente verso terra causata dalla presenza di armoniche. Correnti distorte non sono però l'unica principale causa del malfunzionamento dei dispositivi differenziali: anche la presenza di sovratensioni può provocare lo scatto intempestivo dell'interruttore. Le sovratensioni esterne all'impianto in cui è installato l'interruttore che possono comportare il malfunzionamento dell'interruttore stesso sono di due tipi:

- Sovratensione atmosferica: sovratensione dovuta ad un evento di fulminazione su una parte dell'impianto. Tale fulminazione genera un'onda transitoria di sovratensione che si trasmette lungo la rete, anche per mezzo di fenomeni di riflessione e trasmissione, generando correnti di dispersione attraverso le capacità verso terra. Secondo la Norma CEI 42-4, si può definire impulso di fulminazione quando il suo fronte di salita è più breve di 20  $\mu$ s. Sono generalmente le sovratensioni di intensità maggiore;
- Sovratensione di manovra: si verificano in corrispondenza dell'apertura di circuiti capacitivi (batterie di condensatori), induttivi (motori), e all'interruzione di correnti di cortocircuito. Tali sovratensioni generano correnti di dispersione con forma d'onda paragonabile a quella originata da eventi atmosferici, ma con minor ampiezza e maggior durata; sono tuttavia più frequenti.

In entrambi i casi, generalmente si fa riferimento ad una forma d'onda con un fronte di salita breve (dell'ordine dei  $\mu$ s) ed un fronte di discesa (dell'ordine di decine di  $\mu$ s). Tuttavia l'andamento

reale di tali transitori è oscillante smorzato, a causa della risposta naturale della rete, dettata dalla presenza di componenti reattivi, e al naturale smorzamento degli impulsi atmosferici in caso di eventi di fulminazione. La forma d'onda che si considera è perciò l'involuppo di quello che è il reale andamento della sovratensione, come mostrato in Fig. 39:

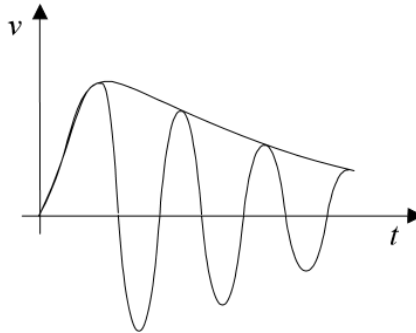


Fig. 39: Involuppo della forma d'onda delle sovratensioni atmosferiche e di manovra

L'estinzione di tali sovracorrenti in linea è affidata a dispositivi quali scaricatori di tensione, interruttori in esafluoruro di zolfo ( $\text{SF}_6$ ) o interruttori a pressione: tali dispositivi hanno componenti non lineari, e quando intervengono generano degli impulsi di corrente elevati (sull'ordine di centinaia di Ampere) di breve durata (inferiore ai ms). Questa corrente fluisce tra fase e terra, interessando perciò gli interruttori differenziali, i quali intervengono in quanto progettati per intervenire a fronte di valori di corrente di dispersione così elevati. Si hanno dunque interventi intempestivi dei dispositivi differenziali.

Per evitare interventi dei dispositivi differenziali in queste situazioni, le norme CEI EN 61008-1, CEI EN 61009-1 e CEI EN 62423 prevedono la verifica del comportamento degli interruttori differenziali in presenza di impulsi di corrente causati da tensioni impulsive tramite una prova di tenuta agli impulsi di corrente: la verifica va eseguita per interruttori differenziali del tipo AC, A, B ed F, ed il procedimento è equivalente indipendentemente dalla classe del dispositivo. Tale verifica si esegue per mezzo di due prove: prova di tenuta all'onda oscillatoria (ring wave)  $0,5 \mu\text{s} / 100 \text{ kHz}$  e prova di tenuta agli impulsi di corrente  $8 / 20 \mu\text{s}$ .

La prova di tenuta all'onda oscillatoria  $0,5 \mu\text{s} / 100 \text{ kHz}$  si esegue utilizzando un generatore di impulsi che fornisce ad un polo dell'interruttore differenziale scelto casualmente una corrente oscillatoria smorzata come quella mostrata in Fig. 40. Tale impulso deve essere applicato 10 volte, invertendo la polarità dell'onda dell'impulso ogni due applicazioni e rispettando un intervallo tra due applicazioni consecutive di 30 secondi.

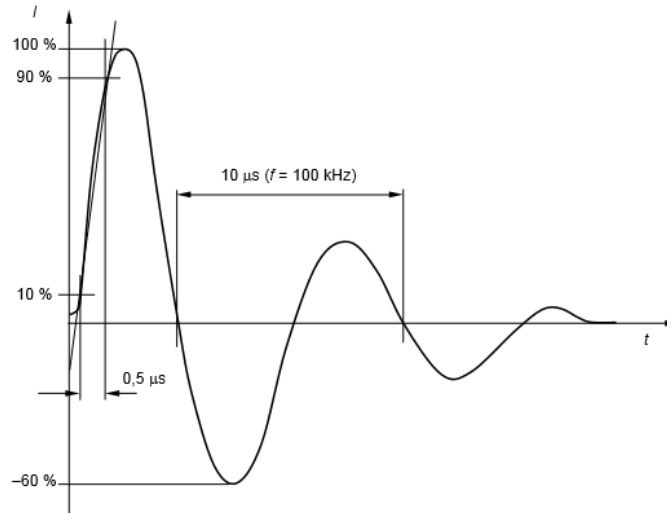


Fig. 40: Ring wave 0,5μs/100kHz

L'impulso di corrente deve rispettare i seguenti parametri:

- Valore di picco: 200 A (con incertezza di misura del +10%) o 25 A (con incertezza di misura del +10%) per interruttori differenziali con  $I_{\Delta n} \leq 10 \text{ mA}$
- Tempo virtuale al fronte (ossia la durata del fronte di salita: tempo che impiega l'onda a raggiungere, partendo da un valore pari al 10% del valore di picco della corrente, un valore pari al 90%):  $0,5 \mu\text{s} \pm 30\%$
- Durata dell'onda oscillatoria seguente (si considera cioè il tempo che intercorre tra il passaggio per lo zero della prima semionda e il passaggio per lo zero della semionda positiva successiva):  $10 \mu\text{s} \pm 20\%$ . Tale semionda deve avere una frequenza pari a 100 kHz
- Valore di picco della prima semionda negativa: 60% del picco precedente

Si considera superata la prova se l'interruttore differenziale non interviene.

Per la prova di tenuta agli impulsi di corrente 8 / 20 μs il procedimento è analogo alla prova precedentemente illustrata, ma si utilizza un generatore di impulsi che genera un impulso con le seguenti caratteristiche:

- Valore di picco: 3000 A (con incertezza di +10%)
- Tempo virtuale al fronte:  $8 \mu\text{s} \pm 20\%$
- Tempo virtuale all'emivalore (tempo che intercorre tra l'inizio dell'impulso ed il raggiungimento, una volta concluso il fronte di salita, di un valore pari al 50% del valore massimo di corrente):  $20 \mu\text{s} \pm 20\%$

- Picco della corrente inversa: inferiore al 30% del valore di picco

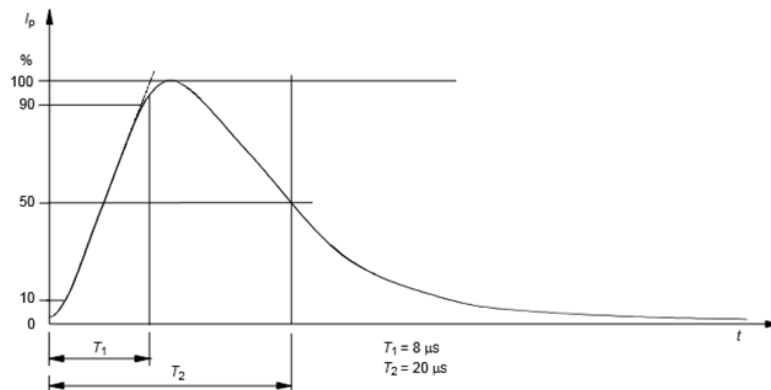


Fig. 41: Impulso di corrente 8/20µs

I risultati di questa prova devono essere analizzati in base al tipo di interruttore differenziale che si è testato: i comportamenti sono infatti differenti se l'interruttore è di tipo generale o di tipo selettivo S. Se l'interruttore testato è di tipo S, la prova si considera superata solo se l'interruttore non interviene. Gli interruttori di tipo generale invece possono intervenire; dopo ogni intervento l'interruttore deve essere richiuso.

È evidente che le prove prescritte dalle norme devono essere eseguite dai costruttori, ma ciò non impedisce di condurne ulteriori. Ad esempio il gruppo industriale Schneider Electric conduce un'ulteriore verifica, basata sulla differenza del comportamento tra interruttori differenziali generali e selettivi: poiché, come descritto dalle norme, nella prova di tenuta agli impulsi di corrente 8 / 20 µs gli interruttori ad intervento istantaneo non sono tenuti ad intervenire, tali dispositivi vengono sottoposti ad un impulso di corrente 8 / 20 µs con corrente di picco pari a 250 A anziché 3000 A:

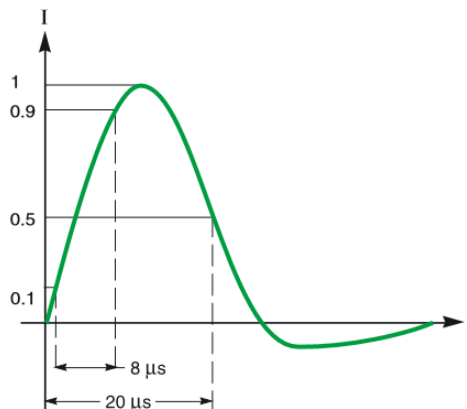


Fig. 42: Onda di prova 8/20 µs con corrente di picco 250 A (in p. u.)

Tale prova è comunque prevista dalla Norma IEC 60 (e ripresa dalla norma francese relativa agli interruttori di utenza NFC62-411).

## **2.8 SOLUZIONI AGLI SCATTI INTEMPESTIVI E PROPOSTE DEI COSTRUTTORI**

Sono stati descritti i fenomeni dell'intervento intempestivo o del mancato intervento degli interruttori automatici differenziali, descrivendone le cause e le condizioni in cui essi si possono verificare. Al fine di garantire un corretto funzionamento dei dispositivi differenziali anche nelle situazioni illustrate, diversi costruttori hanno sviluppato modelli di interruttori differenziali con principi di funzionamento studiati per evitare malfunzionamenti dei dispositivi. Tali modelli, discostandosi almeno in parte dai principi di funzionamento dei dispositivi standard, non sono previsti dalle norme.

È bene comunque specificare che, sebbene dal punto di vista del comportamento dei dispositivi differenziali le norme non forniscano sufficienti indicazioni per evitare gli scatti indesiderati, come sarà illustrato nel prossimo Capitolo, esse forniscono regole riguardo la disposizione degli interruttori differenziali in un impianto al fine di minimizzare i rischi di intervento intempestivo dei dispositivi. La Norma CEI 23-98, che consiste in una guida per il corretto utilizzo degli interruttori automatici differenziali per installazioni domestiche o similari, consiglia due soluzioni:

- Soluzione “installativa”: dividere l'impianto in più circuiti, ognuno dei quali protetto da un differenziale;
- Soluzione “di prodotto”: selezionare differenziali con maggior resistenza a scatti intempestivi

La soluzione “di prodotto” consiste appunto nell'utilizzare dispositivi progettati apposta dai costruttori per evitare gli scatti intempestivi, la soluzione installativa invece consiste in una adeguata progettazione dei circuiti terminali dell'installazione.

Per la soluzione “installativa” si deve fare riferimento alla Norma CEI 64-8 aggiornata entrata in vigore nel mese di novembre del 2012, contenente il capitolo 37, il quale aggiunge alle già presenti indicazioni riguardanti la sicurezza dell'impianto, prescrizioni e raccomandazioni

riguardo la funzionalità dell'impianto elettrico stesso. Tale norma consiglia la suddivisione in parallelo dei circuiti terminali dell'installazione su almeno due interruttori differenziali. Scegliere un numero minimo di interruttori differenziali garantisce, in caso di guasto o di intervento intempestivo da parte di un interruttore, che la restante parte dell'impianto resti comunque attiva. Viene inoltre resa obbligatoria la selettività tra interruttori differenziali: al fine di ottenere la selettività verticale, già stata descritta precedentemente, è dunque necessario l'utilizzo di interruttori differenziali selettivi. Si ottengono così impianti fortemente ramificati in cui l'intervento di un dispositivo differenziale non impedisce l'alimentazione ad eventuali utilizzatori a lui collegati in parallelo, garantendone perciò la continuità di funzionamento.

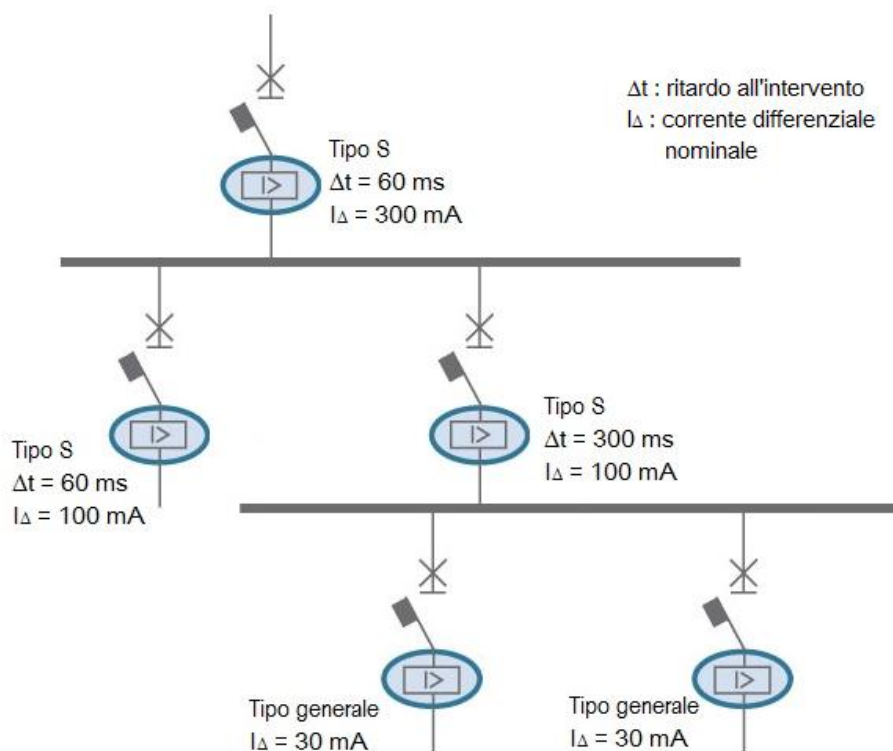


Fig. 43: Esempio di impianto ramificato

Ramificando l'impianto si evita buona parte degli scatti intempestivi, ma si possono prendere ulteriori rimedi, come ad esempio contenere la corrente di dispersione a valori inferiori a quelli compresi nell'intervallo di valori di corrente per cui l'interruttore può intervenire  $[0,5 I_{\Delta n} : I_{\Delta n}]$ : in genere si cerca di contenere la corrente di dispersione a valori non superiori a  $0,3 I_{\Delta n}$ .

Per quanto riguarda la soluzione “di prodotto”, è necessario consultare i cataloghi dei costruttori. Vengono perciò di seguito illustrate le soluzioni ai malfunzionamenti proposte da alcune aziende, presentandone i principi di funzionamento e le caratteristiche.



### 2.8.1 DISPOSITIVO DIFFERENZIALE TIPO APR DELLA ABB

L'azienda ABB (ASEA Brown Boveri) ha sviluppato interruttori differenziali di tipo AC, A e B selettivi; di questi, l'interruttore che ha dimostrato una maggior resistenza alla prova 8 / 20  $\mu$ s (illustrata precedentemente) non è intervenuto a fronte di una corrente con picco di 5000 A. Tuttavia tale dispositivo ha una corrente differenziale di intervento pari a 100 mA, dunque non può essere utilizzata per la protezione da contatto diretto. Per questo motivo sono stati sviluppati dispositivi di tipo APR (antiperturbazioni): essi sono ottenuti impostando un ritardo di intervento di circa 10 ms nei dispositivi standard. Ciò permette di avere interruttori differenziali con corrente differenziale nominale  $I_{\Delta n} = 30$  mA, che possono quindi garantire la protezione in caso di contatti diretti, una maggior resistenza agli interventi intempestivi: nella prova 8 / 20  $\mu$ s infatti non intervengono a fronte di una corrente con picco di 3000 A; si ricorda che per tale prova le norme richiedono il non-intervento ai soli interruttori di tipo selettivo. Pur introducendo come detto il ritardo di intervento di 10 ms, tali dispositivi rispettano i tempi limite di intervento in relazione al tipo di interruttore e alla  $I_{\Delta n}$  stabiliti dalle norme CEI EN 61008-1 e CEI EN 61009-1, riportati nella seguente tabella:

<b>Valori limite della(e) durata(e) di interruzione e di non intervento per interruttori differenziali di tipo AC ed A in caso di correnti differenziali alternate (valori efficaci) uguali a</b>									
<b>Tipo</b>	<b><math>I_n</math> [A]</b>	<b><math>I_{\Delta n}</math> [A]</b>	<b><math>I_{\Delta n}</math></b>	<b><math>2 I_{\Delta n}</math></b>	<b><math>5 I_{\Delta n}</math></b>	<b><math>5 I_{\Delta n}</math> o <math>0,25 A^a</math></b>	<b><math>5 A - 200 A^b</math></b>	<b>500 A</b>	
Generale	Qualsiasi	< 0,03	0,3	0,15		0,04	0,04	0,04	Durate massime di interruzione
		0,03	0,3	0,15		0,04	0,04	0,04	
		> 0,03	0,3	0,15	0,04		0,04	0,04	
S	$\geq 25$	> 0,03	0,5	0,2	0,15		0,15	0,15	Durate minime di non intervento
		> 0,03	0,13	0,06	0,05		0,04	0,04	

<sup>a</sup>: valore da decidere da parte del costruttore per questa prova  
<sup>b</sup>: le prove si effettuano solo durante la verifica del funzionamento corretto

Tab. 6: Valori limite della durata di intervento e non-intervento

Dunque il tempo di non-intervento di questi interruttori non pregiudica la sicurezza in quanto il tempo massimo di apertura è nei limiti previsti dalle norme per gli interruttori non ritardati, come mostrato in Fig. 44:

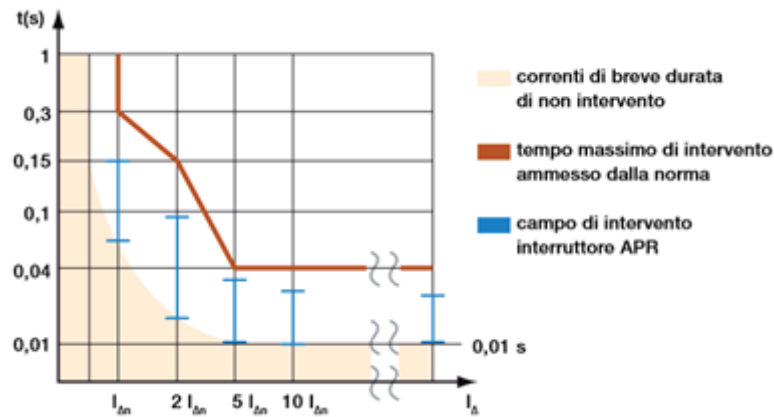


Fig. 44: Tempo di intervento e non-intervento degli interruttori APR della ABB

Inoltre, tenendo conto della diminuzione del pericolo dovuto a correnti ad elevata frequenza, come descritto dalla Norma IEC 60479-2 (discorso affrontato in precedenza), questi interruttori presentano un'immunità alle correnti ad elevata frequenza, poiché rispettano la curva di sicurezza corrente-frequenza adottata per mezzo del Fattore di frequenza, come è possibile vedere in Fig. 45:

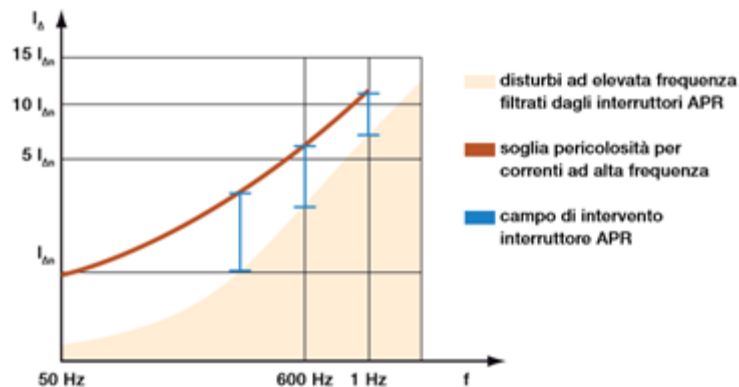


Fig. 45: Soglia di intervento degli interruttori APR in funzione della frequenza

Tali dispositivi risultano quindi efficaci in caso di sovratensioni atmosferiche dovute a fulminazioni o sovratensioni di manovra: il circuito elettronico di cui sono provvisti è in grado, grazie al tempo di ritardo di intervento, di distinguere distorsioni temporanee provocate da disturbi della rete da distorsioni permanenti dovuti a guasti o contatti diretti, aprendo il circuito solo nel secondo caso. Sono adatti anche ad ambienti con correnti di dispersione contenenti armoniche dovute ad apparecchi elettronici in quanto, come visibile in Fig. 45, col crescere della frequenza della corrente di dispersione diminuisce la sensibilità del dispositivo. Ad oggi sono disponibili in commercio interruttori automatici differenziali APR del tipo AC, A e B con corrente nominale  $I_n$

da 25 A a 63 A.

Riassumendo, rispetto agli interruttori standard a pari sensibilità, i dispositivi APR presentano:

- Corrente differenziale di intervento più elevata;
- Tempo di ritardo di intervento;
- Maggiore resistenza a fenomeni di sovratensioni, armoniche e disturbi di tipo impulsivo.

## 2.8.2 DISPOSITIVI DIFFERENZIALI TIPO G E K DELLA SIEMENS

L'azienda tedesca Siemens, al fine di garantire la continuità di esercizio, ha sviluppato i dispositivi differenziali antidisturbo tipo G e K detti “Super Resistenti”. Come i dispositivi sviluppati dalla ABB, anche questi interruttori presentano un ritardo intenzionale all'intervento di  $10 \div 15$  ms, a  $5 I_{\Delta n}$ . I dispositivi tipo G sono adatti per abitazioni, allo scopo di prevenire black-out e preservare il funzionamento dei carichi principali quali frigorifero e PC; i dispositivi di tipo K sono invece pensati per il settore industriale, in presenza di motori, condensatori e convertitori. Viene mostrato in Fig. 46 il tempo di intervento in funzione della corrente differenziale per dispositivi di tipo generale con  $I_{\Delta n} = 30$  mA, dispositivi di tipo selettivo con  $I_{\Delta n} = 300$  mA e dispositivi super resistenti G e K con  $I_{\Delta n} = 30$  mA:

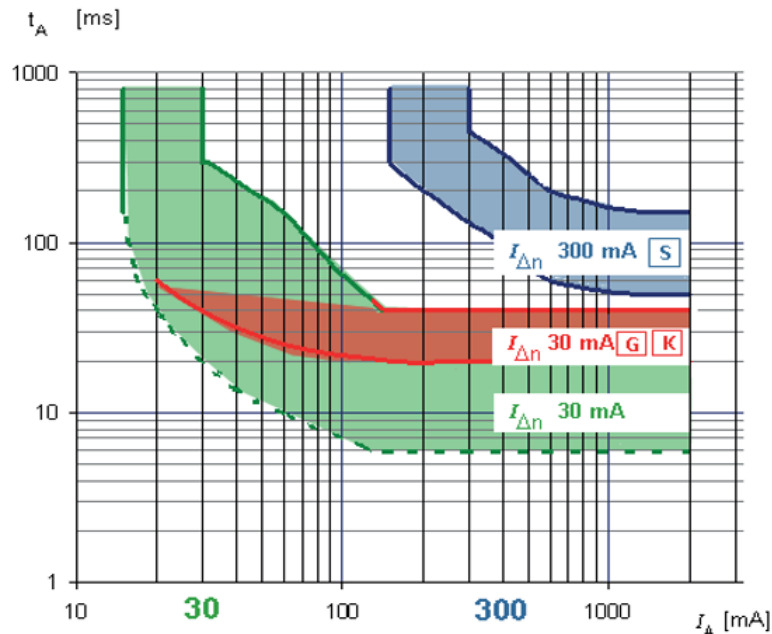


Fig. 46: Correnti di intervento per dispositivi generali da 30 mA, selettivi da 300 mA e tipo G, K da 30 mA

Entrambi i dispositivi superano le prove di tenuta ad impulsi di corrente, superando anche la prova 8 / 20  $\mu\text{s}$  con una corrente di picco pari a 3000 A, dalle norme richiesta solo per interruttori di tipo selettivo S. Come già visto, le norme indicano come tempo limite di intervento 40 ms per gli interruttori differenziali a intervento istantaneo, i quali generalmente intervengono entro i primi 20 ms. Il tempo di ritardo di intervento per  $5 I_{\Delta n}$  permette invece ai dispositivi di tipo G e K di intervenire nell'intervallo di tempo compreso tra 20 ms e 40 ms, riuscendo così ad evitare scatti intempestivi a seguito di perturbazioni di tipo transitorio.

### 2.8.3 DISPOSITIVI DIFFERENZIALI TIPO SI DELLA SCHNEIDER ELECTRIC

Il gruppo industriale francese Schneider Elecòtric ha sviluppato, per i tipi AC, A e B con sensibilità da 30 mA a 500 mA, una gamma di interruttori differenziali chiamata SI (“Super Immunizzati”), concepita appositamente per sopportare le perturbazioni presenti negli impianti senza che si abbiano interventi intempestivi. Questa soluzione è basata, come le precedenti, sull'introduzione di un leggero ritardo (10 ms) all'intervento: tale ritardo viene introdotto da un filtro elettronico posto tra il toroide ed il relè (come schematizzato in Fig. 47). Questo ritardo consente al dispositivo di distinguere disturbi transitori da disturbi permanenti rimanendo nei tempi limite dettati dalla Norma CEI EN 61008-1.

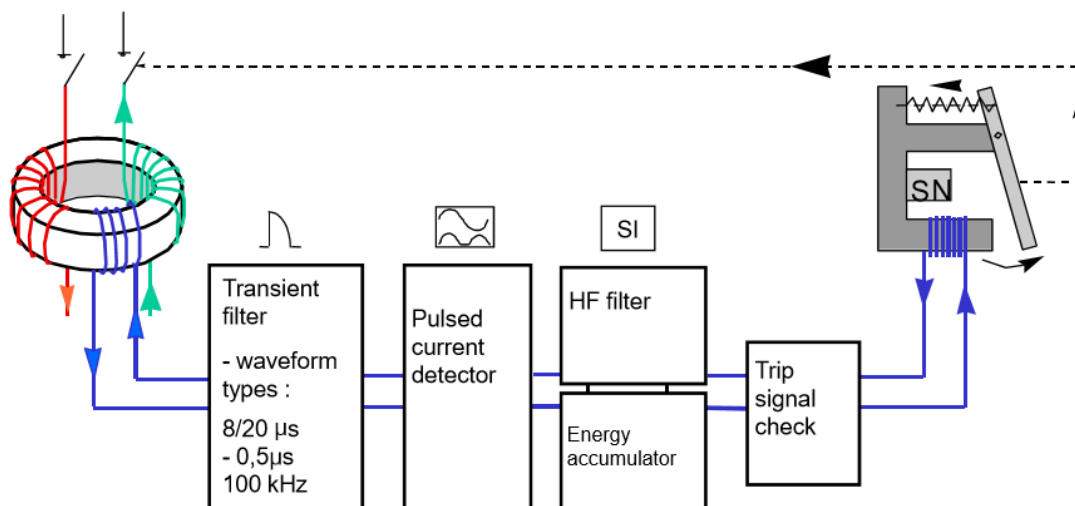


Fig. 47: Schematizzazione di un dispositivo differenziale del tipo A SI

I filtri utilizzati per la gamma SI sono di tipo passa basso e quindi attenuano gli effetti delle componenti ad alta frequenza nelle correnti di dispersione verso terra: il differenziale di tipo

SI realizza perciò un declassamento in frequenza, adattando la soglia di sgancio alla frequenza della corrente: per una corrente di dispersione a 1000 Hz, cui corrisponde un Fattore di frequenza  $F_f = 14$  (come visto in Tab. 4), la soglia di intervento di un interruttore differenziale con corrente differenziale nominale  $I_{\Delta n} = 30$  mA diventa  $14 I_{\Delta n}$ .

I dispositivi di questa gamma sono progettati per funzionare correttamente per temperature fino a  $-25^\circ\text{C}$ .

Questi dispositivi sono adatti per:

- impianti con apparecchiature informatiche, nelle quali sono inseriti dei filtri antidisturbo che generano correnti di dispersione permanenti dell'ordine di  $0,5 \div 1,5$  mA a 50 Hz per apparecchio; l'utilizzo di dispositivi SI permette l'installazione di un massimo di 12 apparecchi a valle dello stesso dispositivo differenziale, senza che si verifichino interventi intempestivi;
- impianti soggetti a fulminazioni: in presenza di una sovratensione dovuta ad una fulminazione la continuità di servizio è garantita associando uno scaricatore di tensione, un dispositivo differenziale 300 / 500 mA tipo SI selettivo per garantire una selettività differenziale totale e un dispositivo differenziale 30 mA tipo SI, installato a protezione degli utilizzatori prioritari

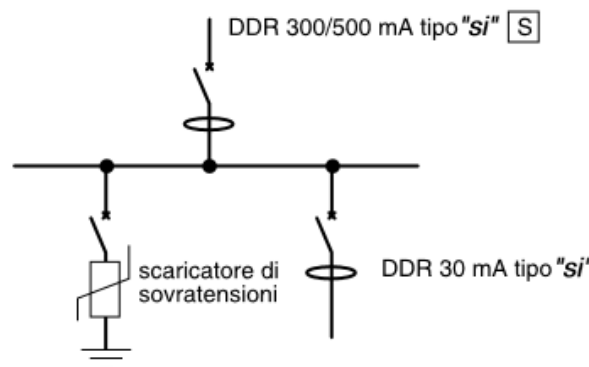


Fig. 48: Impianto di protezione da fulminazioni

- ambienti con lampade fluorescenti con reattore elettronico: le lampade fluorescenti generano correnti di dispersione continue pulsanti, ad alta frequenza per la presenza di filtri capacitivi collegati verso terra, correnti di spunto all'accensione e allo spegnimento a causa dei transistori d'inserzione dovuti alla carica dei condensatori alla messa in tensione.

L'utilizzo di differenziali tipo SI garantisce corretto funzionamento fino a 50 reattori elettronici collegati sulla stessa fase.

La stessa Schneider Electric ha inoltre sviluppato interruttori differenziali immuni a scatti intempestivi adatti per ambienti in cui sono presenti sostanze corrosive o agenti inquinanti, quali ad esempio piscine, porti o campeggi: atmosfere corrosive, inquinanti o con forte grado di umidità possono infatti deteriorare i tradizionali dispositivi differenziali pregiudicandone il corretto funzionamento. I differenziali della gamma SiE, grazie al rivestimento di carbonio amorfo DLC (Diamant Like Carbone) sugli organi interni del differenziale, garantiscono corretto funzionamento anche negli ambienti sopra citati.

I modelli illustrati, come detto, non sono presenti nelle norme; ciò non toglie che essi debbano rispettare i vincoli che le norme definiscono per i modelli standard. È possibile notare che tutti e tre basano il proprio funzionamento sull'introduzione di un lieve ritardo all'intervento, col fine di distinguere disturbi transitori da disturbi permanenti. Ogni dispositivo ottiene tale risultato con metodi differenti (ad esempio per i dispositivi SI della Schneider Electric è stato utilizzato un particolare filtro elettronico come collegamento tra toroide e relè), poiché ogni metodo efficace viene brevettato dal costruttore che lo ha sviluppato.

Il principio di funzionamento basato sull'introduzione di un lieve ritardo all'intervento rappresenta quello che è ad oggi lo stato dell'arte degli interruttori automatici differenziali immuni a disturbi.

## CAPITOLO 3

### *ASPETTI NORMATIVI*

#### **3.1 VERIFICHE DEL CORRETTO FUNZIONAMENTO PREVISTE DALLE NORME**

Le Norme CEI EN 61008 e CEI EN 61009, ovvero le norme che descrivono gli interruttori differenziali del tipo AC ed A puri e magnetotermici, e la Norma CEI EN 62423, che introduce gli interruttori differenziali del tipo F e B, sono, come già detto, le norme a cui i costruttori devono riferirsi per sviluppare i propri dispositivi differenziali. La maggior parte di queste norme è dedicata a prove di tipo da eseguire sugli interruttori al fine di verificare che le caratteristiche siano ad esse conformi. Tali prove, che possono essere eseguite dal costruttore o da organismi di certificazione indipendente, devono essere effettuate su interruttori differenziali nuovi con grandezze d'influenza ai valori normali di riferimento, descritti dalla Norma CEI EN 61008-1:

- Temperatura ambiente compresa tra  $-5\text{ °C}$  e  $+40\text{ °C}$  (l'intervallo può essere più esteso per interruttori differenziali utilizzati per vaste gamme di temperature), con valore di riferimento di  $20\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$ ;
- Altitudine non superiore a 2000 m (per interruttori differenziali destinati all'esercizio ad altezze superiori è necessaria una progettazione specifica e durante le prove occorre tenere in considerazione l'effetto del raffreddamento dell'aria);
- Valore massimo di umidità relativa a  $40\text{ °C}$  pari al 50% (per temperature più basse sono ammesse umidità relative maggiori: ad esempio per una temperatura di  $20\text{ °C}$  si accetta un'umidità relativa del 90%);
- Campo magnetico esterno non superiore al campo magnetico terrestre in qualsiasi direzione;
- Posizione fissata dal costruttore con una tolleranza di  $2^\circ$  in qualsiasi direzione;
- Frequenza del valore nominale  $\pm 2\%$ ;
- Distorsione dell'onda sinusoidale non superiore al 5%.

In aggiunta alle condizioni esterne appena viste, la norma specifica le condizioni di prova riguardanti la montatura dell'interruttore e descrive come deve essere effettuato il collegamento con conduttori di apposita sezione.

Le numerose prove previste dalle norme sono di svariato genere, e comprendono prove puramente "fisiche", quali ad esempio indelebilità di marcatura, affidabilità di viti e morsetti, resistenza a sollecitazioni meccaniche e urti, ma anche prove riguardanti il corretto funzionamento sotto determinate forme di correnti. Trascurando dunque la prova all'impulso di corrente, in quanto già illustrata, si procede presentando le prove prescritte dalle norme vigenti per verificare la caratteristica di intervento degli interruttori, per cui è necessario allestire circuiti di prova in relazione al tipo di prova e al tipo di interruttore.

## **3.2 VERIFICA DELLA CARATTERISTICA DI INTERVENTO**

Poiché le tre norme a cui i costruttori devono far riferimento per verificare la conformità dei loro prodotti trattano tipi diversi di interruttori, ognuna di esse prescrive norme diverse. Nello specifico, la Norma CEI EN 61008-1 prevede prove da effettuare su interruttori differenziali puri del tipo AC ed A, e tali prove vanno eseguite anche per gli interruttori di altro tipo. La Norma CEI EN 61009-1 aggiunge prove da effettuare su interruttori differenziali magnetotermici del tipo AC ed A, ed infine la Norma CEI EN 62423 aggiunge prove da effettuare su interruttori differenziali del tipo F e B.

Si procede dunque illustrando le prove descritte dalla Norma CEI EN 61008-1, ed in seguito l'integrazione delle norme CEI EN 61009-1 e CEI EN 62423.

### **3.2.1 PROVE PER LA VERIFICA DELLA CARATTERISTICA DI INTERVENTO PREVISTE DALLA NORMA CEI EN 61008-1**

Per la verifica della caratteristica di intervento, la Norma 61008-1 indica un preciso circuito su cui effettuare la verifica, la cui induttanza deve essere trascurabile. Tale circuito è illustrato nella seguente figura, in cui si possono distinguere un voltmetro ed un amperometro: essi vengono utilizzati per la misura della corrente differenziale e devono indicare il vero valore efficace. Durante le prove per effettuare la verifica delle caratteristiche di intervento, l'interruttore



$S_3$  resta sempre chiuso: per questa verifica infatti l'alimentazione deve essere continua, dunque la presenza di tale interruttore è superflua.

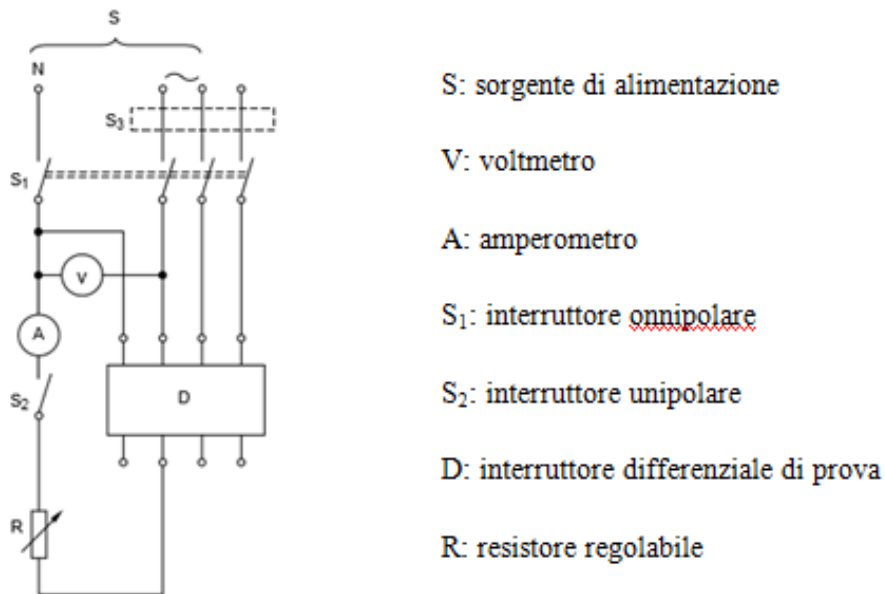


Fig. 49: Circuito di prova

Per la verifica delle caratteristiche di intervento vengono eseguite diverse prove: esse vengono effettuate alla frequenza nominale del dispositivo in prova, dunque per dispositivi aventi più frequenze nominali è necessario effettuare ogni prova sia alla frequenza più alta che alla frequenza più bassa.

La verifica consiste nel valutare il corretto funzionamento in assenza di carico e in presenza di carico in diverse condizioni di esercizio.

Le prove senza carico devono essere eseguite con correnti alternate sinusoidali differenziali alla temperatura di riferimento di  $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$  applicate ad un solo polo dell'interruttore di prova scelto casualmente. Si considerano quattro diverse condizioni, e per ognuna devono essere eseguite diverse misure:

- Corrente differenziale in graduale aumento: inizialmente l'interruttore differenziale è mantenuto chiuso, come anche gli interruttori  $S_1$  ed  $S_2$ ; per mezzo del resistore R si aumenta gradualmente la corrente differenziale partendo da un valore  $I_{\Delta n0} \leq 0.2 I_{\Delta n}$  fino al valore  $I_{\Delta n}$ , entro 30 s. Si effettua la prova cinque volte misurando ogni volta la corrente di intervento, la quale deve essere compresa nell'intervallo  $[I_{\Delta n0}; I_{\Delta n}]$ .

- Condizioni di servizio: mantenendo chiusi gli interruttori  $S_1$  ed  $S_2$ , si simulano le condizioni di servizio chiudendo l'interruttore differenziale sul circuito di prova, regolato in successione ad ognuno dei valori di corrente differenziale specificati nella tabella sottostante:  $I_{\Delta n}$  ;  $2 I_{\Delta n}$  ;  $5 I_{\Delta n}$  o  $0.25 A$  ;  $5 A - 200 A$ ;  $500 A$ . Per ogni valore di corrente differenziale viene misurata cinque volte la durata dell'interruzione, che non deve superare il valore limite specificato in Tab. 7. Ogni applicazione di corrente differenziale deve essere separata dalla precedente da un intervallo di almeno 1 min.

Valori limite della (e) durata(e) di interruzione e di non intervento per interruttori differenziali di tipo AC ed A in caso di correnti differenziali alternate (valori efficaci) uguali a									
Tipo	$I_n [A]$	$I_{\Delta n} [A]$	$I_{\Delta n}$	$2 I_{\Delta n}$	$5 I_{\Delta n}$	$5 I_{\Delta n}$ o $0,25 A^a$	$5 A - 200 A^b$	$500 A$	
Generale	Qualsiasi	$< 0,03$	$0,3$	$0,15$		$0,04$	$0,04$	$0,04$	Durate massime di interruzione
		$0,03$	$0,3$	$0,15$		$0,04$	$0,04$	$0,04$	
		$> 0,03$	$0,3$	$0,15$	$0,04$		$0,04$	$0,04$	
S	$\geq 25$	$> 0,03$	$0,5$	$0,2$	$0,15$		$0,15$	$0,15$	Durate minime di non intervento
		$> 0,03$	$0,13$	$0,06$	$0,05$		$0,04$	$0,04$	
<i><sup>a</sup>: valore da decidere da parte del costruttore per questa prova</i>									
<i><sup>b</sup>: le prove si effettuano solo durante la verifica del funzionamento corretto</i>									

Tab. 7: Valori limite della durata di intervento e non-intervento

- Applicazione improvvisa della corrente differenziale: si mantengono le condizioni di servizio come sopra descritto, ma con  $S_1$  inizialmente aperto. La chiusura di  $S_1$  stabilisce la tensione di prova, in corrispondenza della quale l'interruttore differenziale deve intervenire. Per ogni valore di corrente differenziale si misura per cinque volte la durata dell'interruzione, che deve rispettare i valori descritti in Tab. 7. Se l'interruttore è di tipo selettivo è necessaria un'ulteriore prova: si verifica il corretto funzionamento anche nel caso in cui inizialmente sia il solo  $S_1$  ad essere chiuso (oltre all'interruttore differenziale di prova) e sia la chiusura di  $S_2$  a stabilire la corrente differenziale, il quale viene riaperto dopo un tempo pari al tempo minimo di non intervento del dispositivo differenziale (con una tolleranza del -5%). L'interruttore selettivo non deve mai intervenire. Queste prove si eseguono anche con una temperatura ambiente pari a  $-5^\circ C$ , per verificare il corretto funziona-

mento in presenza di temperature ambiente limite.

- Applicazione improvvisa di correnti differenziali di valori compresi tra  $5 I_{\Delta n}$  e  $500 A$ : si mantengono le condizioni di servizio con  $S_1$  chiusa, e la chiusura di  $S_2$  stabilisce la corrente differenziale. Il circuito di prova è calibrato a due valori qualsiasi del seguente elenco:  $5 A - 10 A - 20 A - 50 A - 100 A - 200 A$ ; si eseguono cinque misure per cinque diversi valori di corrente differenziale e si misura la durata dell'interruzione, la quale deve rispettare i valori di Tab. 7.

Per la verifica del corretto funzionamento con carico si eseguono le prove di misura della durata dell'interruzione in condizioni di servizio e con applicazione improvvisa della corrente differenziale, entrambe appena illustrate. L'interruttore differenziale deve essere però caricato con corrente nominale come durante il normale servizio, per un tempo sufficiente al raggiungimento del regime termico. Per la verifica del corretto funzionamento in presenza di temperature limite si esegue la prova con applicazione improvvisa della corrente differenziale considerando una temperatura ambiente pari a  $+40\text{ }^\circ\text{C}$ .

Nel 2015 è stata aggiunta nella norma una verifica supplementare per i soli interruttori differenziali del tipo A, che richiede l'utilizzo di ulteriori circuiti:

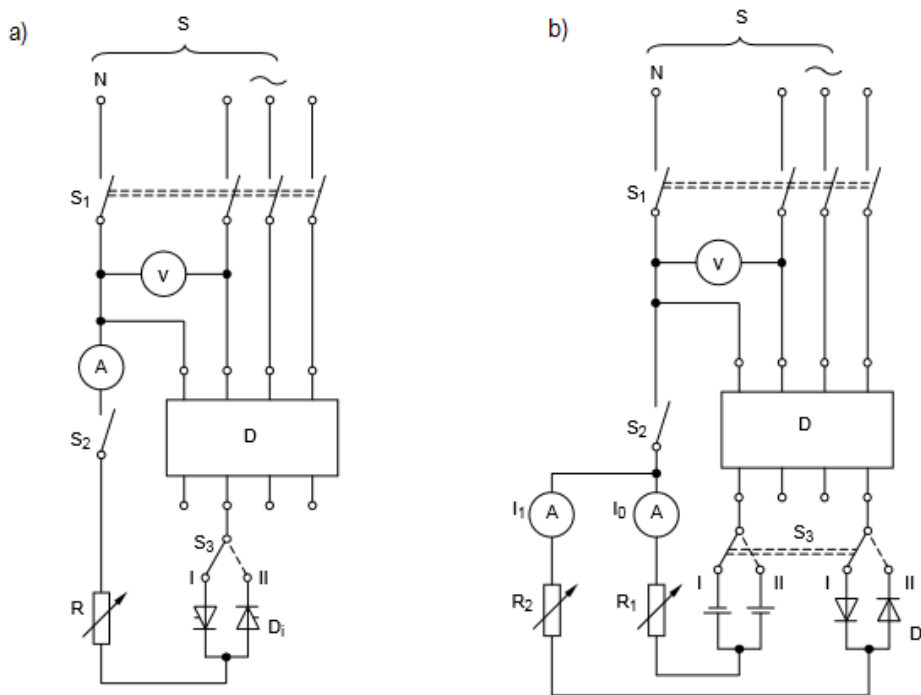


Fig. 50: Circuiti di prova per le prove aggiuntive per interruttori di tipo A

La Norma CEI EN 61008-1+A2 prevede che per gli interruttori del tipo A debbano essere eseguite verifiche del corretto funzionamento tramite prove senza carico e con carico anche per il circuito di Fig. 50a: nello specifico devono essere eseguite la prova con corrente gradualmente crescente e una prova con correnti pulsanti unidirezionali applicate istantaneamente. Il procedimento delle due prove è analogo sia nel caso in cui non sia presente il carico che nel caso in cui il carico sia simulato caricando con la corrente nominale l'interruttore differenziale.

Angolo $\alpha$	Corrente d'Intervento [A]	
	Limite inferiore $I_{\Delta n}$	Limite superiore $I_{\Delta n}$
$0^\circ$	0,35	} 1,4 o 2
$90^\circ$	0,25	
$135^\circ$	0,11	

Tab. 8: Campi di correnti d'intervento per interruttori differenziali di tipo A

La prova con corrente gradualmente crescente si svolge mantenendo inizialmente l'interruttore differenziale di prova e gli interruttori  $S_1$  ed  $S_2$  chiusi. Il tiristore deve essere comandato in modo che l'angolo di ritardo della corrente sia  $\alpha = 0^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ . Ogni polo dell'interruttore differenziale deve essere provato per ogni angolo di ritardo sia nella posizione I che nella posizione II dell'interruttore ausiliario  $S_3$ ; la corrente deve avere una rampa più ripida se il dispositivo ha una corrente differenziale d'intervento  $I_{\Delta n} \leq 10$  mA. Si misura dunque la corrente d'intervento per ogni prova, la quale deve rispettare i valori di Tab. 8; si può notare che la corrente d'intervento diminuisce con l'aumentare del ritardo.

		Valori massimi della(e) durata(e) di interruzione per interruttori differenziali di tipo A in caso di correnti differenziali a semionda pulsante (valori efficaci) uguali a								
Tipo	$I_n$ [A]	$I_{\Delta n}$ [A]	$1,4 I_{\Delta n}$	$2 I_{\Delta n}$	$2,8 I_{\Delta n}$	$4 I_{\Delta n}$	$7 I_{\Delta n}$	0,35 A	0,5 A	350 A
Generale		< 0,03		0,3		0,15			0,04	0,04
		0,03	0,3		0,15			0,04		0,04
		> 0,03	0,3		0,15		0,04			0,04
S	$\geq 25$	> 0,03	0,5		0,2		0,15			0,15

Tab. 9: Valori limite della durata massima di intervento

La verifica del corretto funzionamento in caso di correnti pulsanti unidirezionali applicati

istantaneamente si esegue invece mantenendo chiusi l'interruttore differenziale di prova e l'interruttore ausiliario  $S_1$ , mentre si utilizza l'interruttore  $S_2$  per stabilire istantaneamente una corrente differenziale con  $\alpha = 0^\circ$  mediante la sua chiusura. La prova viene effettuata per i valori di corrente differenziale presenti in Tab. 9, e per ogni valore di corrente si effettua una prima misura del tempo di interruzione quando l'interruttore  $S_3$  è in posizione I e una seconda misura quando  $S_3$  è in posizione II: la prova si considera superata se tutti i tempi di intervento misurati non superano i valori specificati in Tab. 9.

Infine si conduce la verifica del corretto funzionamento in caso di correnti pulsanti unidirezionali con sovrapposta una corrente continua senza ondulazioni utilizzando il circuito di Fig. 50b: si applica a ciascun polo dell'interruttore differenziale di prova una corrente differenziale raddrizzata a semionda (con angolo di ritardo  $\alpha = 0^\circ$ ) con sovrapposta una corrente continua senza ondulazioni di 6 mA. La corrente a semionda, inizialmente nulla, cresce con una rampa a pendenza di  $1.4 I_{\Delta n} / 30$  A al secondo per interruttori differenziali con  $I_{\Delta n} > 0.01$  A e pendenza di  $2 I_{\Delta n} / 30$  A al secondo per interruttori differenziali con  $I_{\Delta n} \leq 0.01$  A. Viene misurato, due volte per ciascuna posizione I e II, il valore della corrente d'intervento: la prova si considera superata se essa è inferiore a  $1.4 I_{\Delta n}$  o  $2 I_{\Delta n}$  rispettivamente.

Per gli interruttori differenziali con funzionamento dipendente dalla tensione di rete, quali ad esempio gli interruttori di tipo elettronico, ogni prova viene eseguita applicando ai rispettivi morsetti una tensione pari a 1.1 e 0.85 volte la tensione nominale: è la Norma CEI EN 61008-1 stessa a stabilire che gli interruttori differenziali con funzionamento dipendente dalla tensione di rete debbano funzionare in modo corretto per valori di tensione di rete compresi tra 0.85 e 1.1 volte la tensione nominale. Il circuito di Fig. 49 viene utilizzato per verificare il corretto funzionamento di interruttori differenziali di tipo selettivo con funzionamento dipendente dalla tensione di rete in caso di difetto della tensione di rete stessa: la Norma CEI EN 61008-1 prevede un'alimentazione dal lato rete alla tensione nominale, con la disinserzione di tutte le fasi eccetto una per mezzo dell'interruttore  $S_3$ . Per eseguire tale verifica, il dispositivo di prova viene sottoposto alle prove senza carico presentate precedentemente e deve mostrare un tempo di non-intervento idoneo con quello fornito dal costruttore. La prova del caso di corrente gradualmente crescente viene effettuato solo se il dispositivo ha un ritardo maggiore dei 30 s richiesti dalla norma per raggiungere il valore di  $I_{\Delta n}$ .

### **3.2.2 PROVE AGGIUNTIVE INTRODOTTE DALLA NORMA CEI EN 61009-1**

La Norma CEI EN 61009-1 fornisce prove aggiuntive per quanto riguarda i dispositivi di classe AC ed A magnetotermici: dovendo infatti questi essere in grado di garantire protezione anche in caso sovracorrenti, è necessario verificarne il corretto funzionamento in tali condizioni. Per gli interruttori magnetotermici devono quindi essere eseguite, oltre alle prove già illustrate, prove che verifichino la conformità alle norme della caratteristica di intervento in caso di sovracorrente:

- a) Prova della caratteristica tempo/sovracorrente: si verifica che l'interruttore differenziale non intervenga se, partendo da "freddo" (il termine "freddo" significa senza carico precedente, alla temperatura di riferimento per la calibrazione), viene attraversato da una corrente uguale a  $1.13 I_n$  (valore che la stessa Norma CEI EN 61009-1 identifica come corrente convenzionale di non intervento). La corrente viene quindi aumentata gradualmente fino a  $1.45 I_n$ , definita dalla norma come corrente convenzionale di intervento, in corrispondenza della quale l'interruttore deve intervenire rispettando il tempo di intervento ( $t < 1$  h per  $I_n \leq 63$  A,  $t < 2$  h per  $I_n > 63$  A). Infine, partendo da freddo, si fa attraversare il dispositivo da una corrente pari a  $2.55 I_n$ , il quale deve intervenire in un tempo superiore a 1 s ma inferiore a 1 min per  $I_n \leq 32$  A e inferiore a 2 min per  $I_n > 32$  A.
- b) Prova di intervento istantaneo e di apertura corretta dei contatti: in relazione alla corrente di intervento istantaneo (minimo valore di corrente che provoca l'apertura automatica dell'interruttore differenziale senza ritardo intenzionale), gli interruttori magnetotermici vengono suddivisi in differenziali del tipo B, del tipo C e del tipo D. Per questa prova occorre allora fare scorrere attraverso al dispositivo correnti di diverso valore in base al tipo: partendo da freddo, si fa attraversare il differenziale del tipo B da una corrente di  $3 I_n$ , il differenziale del tipo C da una corrente di  $5 I_n$ , e il differenziale del tipo D da una corrente di  $10 I_n$ . Nessuno dei tre deve avere un tempo di apertura inferiore a 0.1 s. La prova prosegue facendo attraversare il differenziale del tipo B da una corrente di  $5 I_n$ , il differenziale del tipo C da una corrente di  $10 I_n$ , e il differenziale del tipo D da una corrente pari a  $20 I_n$ . Tutti e tre devono intervenire in un tempo inferiore a 0.1 s.

Di seguito è riportata una tabella riassuntiva delle prove appena descritte:

<b>Prova</b>	<b>Tipo</b>	<b>Corrente di prova</b>	<b>Condizione iniziale</b>	<b>Tempo limite di intervento o di non intervento</b>	<b>Risultato da ottenere</b>
a)	B, C, D	1,13 $I_n$	Freddo	$t \leq 1 \text{ h}$ (per $I_n \leq 63 \text{ A}$ ) $t \leq 2 \text{ h}$ (per $I_n > 63 \text{ A}$ )	Non intervento
		1,45 $I_n$	Subito dopo la prova	$t < 1 \text{ h}$ (per $I_n \leq 63 \text{ A}$ ) $t < 2 \text{ h}$ (per $I_n > 63 \text{ A}$ )	Intervento
		2,55 $I_n$	Freddo	$1 \text{ s} < t < 60 \text{ s}$ (per $I_n \leq 32 \text{ A}$ ) $1 \text{ s} < t < 120 \text{ s}$ (per $I_n > 32 \text{ A}$ )	Intervento
b)	B	3 $I_n$	Freddo	$0,1 < t < 45 \text{ s}$ ( $I_n \leq 32 \text{ A}$ ) $0,1 < t < 90 \text{ s}$ ( $I_n > 32 \text{ A}$ )	Intervento
	C	5 $I_n$		$0,1 < t < 15 \text{ s}$ ( $I_n \leq 32 \text{ A}$ ) $0,1 < t < 30 \text{ s}$ ( $I_n > 32 \text{ A}$ )	
	D	10 $I_n$		$0,1 < t < 4 \text{ s}$ ( $I_n \leq 32 \text{ A}$ ) $0,1 < t < 8 \text{ s}$ ( $I_n > 32 \text{ A}$ )	
	B	5 $I_n$	Freddo	$t < 0,1 \text{ s}$	Intervento
C	10 $I_n$				
D	20 $I_n$				

Tab. 10: Caratteristiche di tempo-corrente

In ultimo si verifica la conformità del comportamento dell'interruttore differenziale magnetotermico considerando l'effetto della temperatura ambiente sulla caratteristica di intervento; la Norma CEI EN 61009-1 prevede per i differenziali magnetotermici le due seguenti prove:

- Verifica per basse temperature: l'interruttore viene posto in un ambiente ad una temperatura inferiore a quella di riferimento di  $(35 \pm 2) \text{ }^\circ\text{K}$ , fino a quando non ha raggiunto il regime termico. Il dispositivo viene fatto attraversare da una corrente pari a  $1.13 I_n$  (corrente convenzionale di non intervento), che viene fatta aumentare fino a  $1.9 I_n$  entro 5 s: la prova si considera superata se l'interruttore interviene entro il tempo convenzionale (il tempo convenzionale è stabilito dalla Norma CEI EN 61009-1 pari a 1 h per dispositivi aventi  $I_n \leq 63 \text{ A}$  e pari a 2 h per dispositivi aventi  $I_n > 63 \text{ A}$ ).
- Verifica per alte temperature: l'interruttore viene posto in un ambiente ad una temperatura superiore a quella di riferimento di  $(10 \pm 2) \text{ }^\circ\text{K}$ , fino a quando non è stato raggiunto il regime termico. Il dispositivo viene fatto attraversare da una corrente del valore  $I_n$ : la prova si considera superata se l'interruttore non interviene entro il tempo convenzionale stabilito dalla Norma CEI EN 61009-1.

### 3.2.3 PROVE AGGIUNTIVE INTRODOTTE DALLA NORMA CEI EN 62423

Poiché gli interruttori differenziali del tipo F e B presentano, oltre alle caratteristiche dei dispositivi del tipo AC ed A, campi di funzionamento per intervalli di frequenze più estese (fino a 1000 Hz) e, nel solo caso di interruttore del tipo B, capacità di interruzione di correnti differenziali continue, la Norma CEI EN 62423 introduce per questi dispositivi, col fine di verificarne il corretto funzionamento, delle prove che si aggiungono alle prescrizioni per gli interruttori differenziali di tipo A. Tutte le prove introdotte da questa norma devono essere effettuate con il dispositivo differenziale alimentato alla tensione nominale, a frequenza nominale e senza carico.

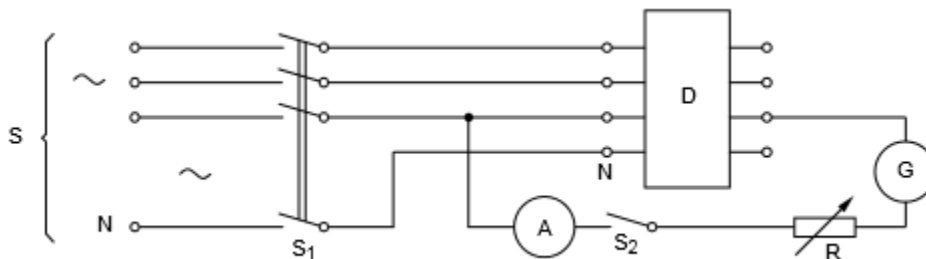


Fig. 51: Circuito di prova per interruttori differenziali del tipo F e B

Utilizzando il circuito di Fig. 51, in cui si può notare la presenza di un generatore di forma d'onda arbitraria (combinazione di 10 Hz, 50 Hz e 1 kHz), la norma specifica allora di verificare il corretto funzionamento nel caso di:

- Aumento costante della corrente differenziale composta: mantenendo chiusi gli interruttori  $S_1$ ,  $S_2$  ed il dispositivo differenziale, viene sottoposto un polo scelto a caso dell'interruttore differenziale di prova a una corrente differenziale composta (i cui valori efficaci delle componenti sono indicati in Tab. 11), del valore efficace iniziale pari a  $0,2 I_{\Delta n}$ , che aumenta a velocità costante.

Valori delle componenti delle correnti di prova a frequenze diverse (valore efficace)			Valore della corrente composta iniziale (valore efficace)
$I_{\text{frequenza nominale}}$	$I_{1\text{kHz}}$	$I_{F \text{ motore } (10 \text{ Hz})}$	$I_{\Delta}$
$0,138 I_{\Delta n}$	$0,138 I_{\Delta n}$	$0,035 I_{\Delta n}$	$0,2 I_{\Delta n}$

Tab. 11: Valori efficaci delle correnti di prova



Si considera la prova superata se, dopo averla eseguita tre volte, l'interruttore interviene in ogni prova entro i valori limite indicati nella tabella sottostante:

<b>Corrente di funzionamento (valore efficace)</b>	
<i>Limite inferiore</i>	<i>Limite superiore</i>
$0,5 I_{\Delta n}$	$1,4 I_{\Delta n}$

**Tab. 12:** Gamma di corrente di funzionamento per corrente differenziale composta

- Applicazione improvvisa della corrente differenziale composta: mantenendo inizialmente chiusi interruttore differenziale ed interruttore  $S_1$ , si stabilisce improvvisamente una corrente differenziale con valore efficace pari a 5 volte il limite superiore indicato in Tab. 12 tramite la chiusura di  $S_2$ . Si eseguono allora tre misure della durata di interruzione, la quale deve essere inferiore a 0.04 s per i differenziali di tipo generale e inferiori a 0.15 s per i differenziali di tipo selettivo. Per questi ultimi deve inoltre essere effettuata la prova di non intervento: si chiude l'interruttore  $S_2$  per un tempo pari alla durata minima di non intervento 0.05 s (con tolleranza di - 5%) verificando che il dispositivo non intervenga.
- Correnti differenziali impulsive: per questa prova si utilizza un generatore G in grado di produrre un impulso sinusoidale unico di semionda a 50 Hz o 60 Hz. Mantenendo chiusi l'interruttore differenziale,  $S_1$  ed  $S_2$ , si sceglie a caso un polo e si applica un impulso di corrente con un picco pari a  $10 I_{\Delta n}$ . Si effettuano tre misure nella polarità positiva e tre nella polarità negativa, alternando la polarità dopo ciascuna prova e facendo passare 30 s tra un impulso e l'altro. La prova si considera superata se l'interruttore non interviene mai.
- Correnti pulsanti unidirezionali in presenza di corrente continua permanente senza ondulazioni di 0.01 A: si esegue unicamente per gli interruttori del tipo F. La prova serve per verificare che tale interruttore presenti un corretto funzionamento anche per correnti continue superiori a 6 mA: come già detto infatti, mentre l'interruttore differenziale del tipo A deve garantire un corretto funzionamento in caso di correnti pulsanti unidirezionali con sovrapposta una corrente continua di 6 mA, gli interruttori del tipo F devono garantire corretto funzionamento in presenza di una corrente continua sovrapposta di 10 mA. Dunque per il dispositivo di tipo F la Norma CEI EN 62423 prevede una prova del tutto analoga a quella che la Norma CEI EN 61008-1+A2 prevede per gli interruttori A, ma applicando una corrente differenziale raddrizzata a semionda (con angolo di ritardo  $\alpha = 0^\circ$ ) con sovrapposta una corrente continua senza ondulazione di 10 mA anziché di 6 mA.

La Norma CEI EN 62423 prevede poi delle prove aggiuntive da effettuare per i soli interruttori differenziali del tipo B che, come illustrato precedentemente e come verrà richiamato durante la presentazione delle prove, devono garantire efficacia anche in condizioni di funzionamento differenti da quelle viste finora nello studio delle prove. Si eseguono perciò ulteriori prove, con l'interruttore alimentato prima a  $0.85 U_n$  e poi a  $1.1 U_n$  con frequenza nominale e senza carico, per verificarne il corretto funzionamento in caso di:

- Correnti differenziali alternate sinusoidali fino a 1000 Hz: un interruttore differenziale del tipo B deve garantire protezione in caso di correnti alternate sinusoidali fino a 1 kHz, per verificarlo si utilizza il circuito di Fig. 51, mantenendo interruttore differenziale e interruttori  $S_1$  ed  $S_2$  chiusi. Partendo da un valore pari a  $0.2 I_{\Delta n}$ , viene fatta aumentare gradualmente la corrente differenziale applicata ad un polo scelto casualmente dell'interruttore differenziale di prova cercando di raggiungere il valore di intervento indicato nella tabella sottostante entro 30 s, misurando la corrente di intervento. La prova viene ripetuta due volte per ciascun valore di frequenza indicato, e si considera superata se la corrente di intervento è conforme ai valori di Tab. 13.

<b>Frequenza [Hz]</b>	<b>Corrente di non intervento differenziale <math>I_{\Delta n}</math></b>	<b>Corrente di intervento differenziale <math>I_{\Delta n}</math></b>
150	$0,5 I_{\Delta n}$	$2,4 I_{\Delta n}$
400	$0,5 I_{\Delta n}$	$6 I_{\Delta n}$
1000	$I_{\Delta n}$	$14 I_{\Delta n}$

**Tab. 13:** Correnti di intervento e non intervento per un interruttore differenziale del tipo B

Una seconda serie di prove viene effettuata per verificare la durata dell'interruzione: il circuito viene regolato alla corrente differenziale di intervento corrispondente a 1000 Hz secondo la tabella sopra riportata, e si mantengono chiusi solo l'interruttore differenziale ed  $S_1$ . La chiusura di  $S_2$  stabilisce una corrente differenziale improvvisa che deve far intervenire il dispositivo. Si esegue la prova due volte e la durata massima di interruzione misurata non deve superare 0.3 s per gli interruttori differenziali di tipo generale e 0.5 s per quelli di tipo S.

- Corrente differenziale alternata sovrapposta ad una corrente differenziale continua senza ondulazioni: in queste condizioni il dispositivo differenziale del tipo B deve garantire la protezione per correnti continue pari a  $0.4 I_{\Delta n}$  o 10 mA, in base al valore più elevato dei

due. Per questa prova si utilizza il circuito di Fig. 52a, con l'interruttore differenziale e gli interruttori  $S_1$  ed  $S_2$  chiusi. Viene applicata ad un polo scelto casualmente dell'interruttore differenziale una corrente differenziale continua senza ondulazioni del valore più alto tra  $0.4 I_{\Delta n}$  e 10 mA. Ad un altro polo dell'interruttore differenziale viene applicata la corrente differenziale alternata della frequenza nominale, e viene aumentata gradualmente partendo dal valore  $0.2 I_{\Delta n}$  fino al valore di  $I_{\Delta n}$  entro 30 s. La prova si effettua due volte per ciascuna posizione I e II dell'interruttore ausiliario  $S_3$ . La prova si considera superata se la corrente di intervento non è mai superiore a  $I_{\Delta n}$ .

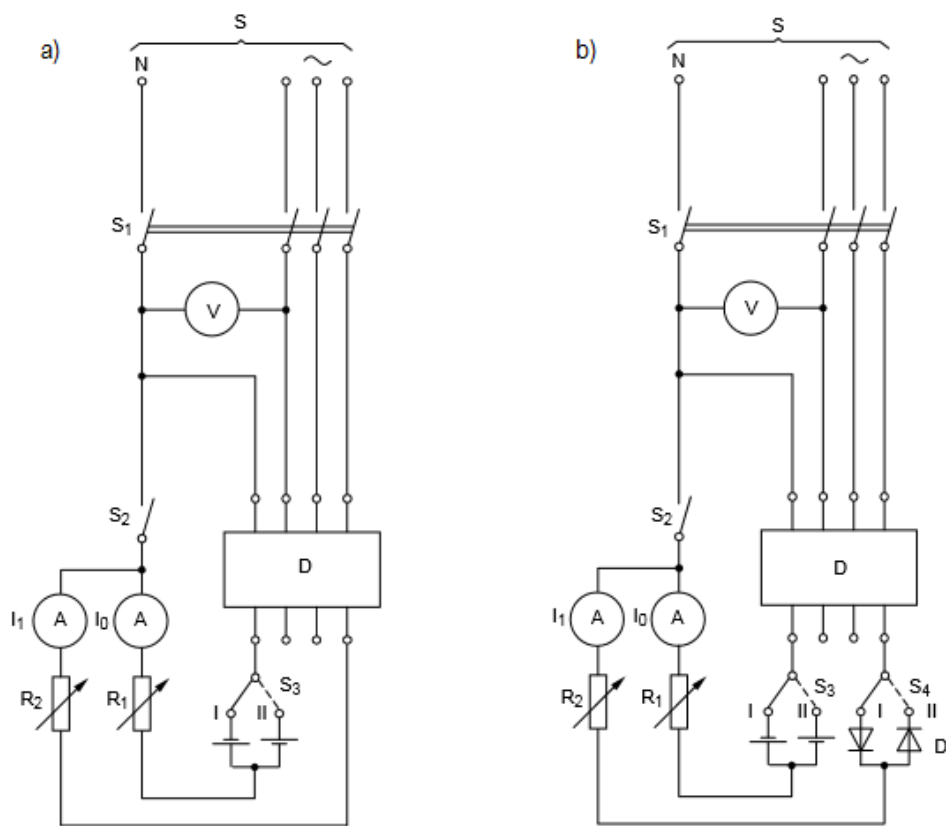
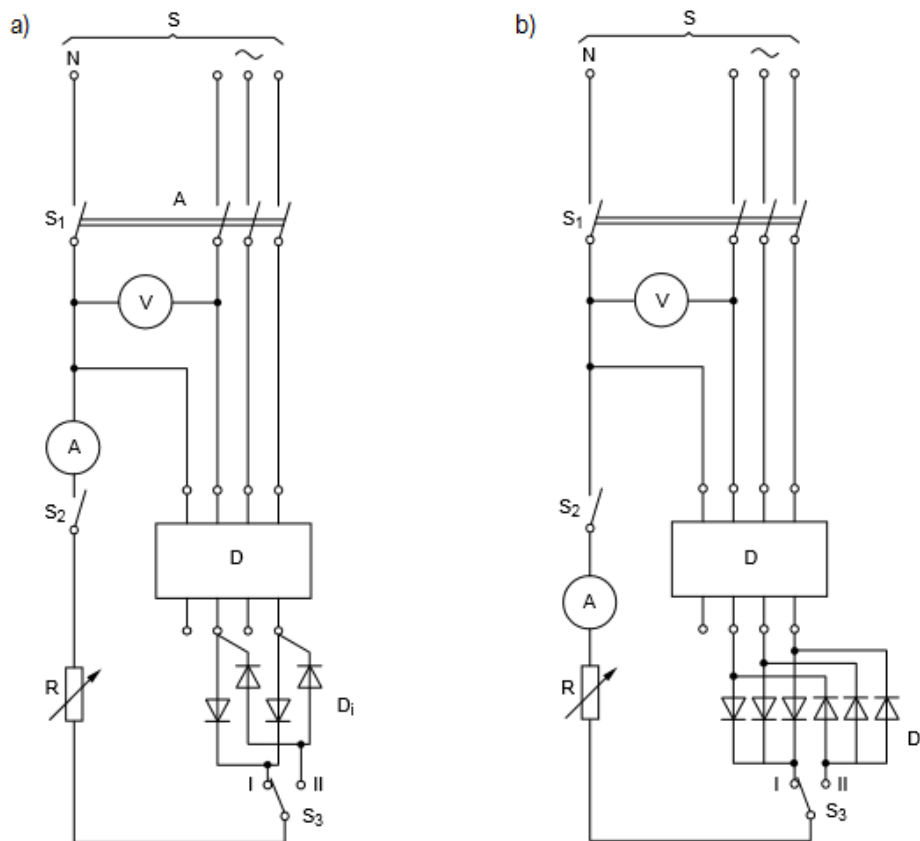


Fig. 52: Circuiti di prova per l'interruttore del tipo B

- Corrente differenziale pulsante sovrapposta ad una corrente differenziale continua senza ondulazioni: si utilizza il circuito di Fig. 52b con l'interruttore differenziale e gli interruttori  $S_1$  ed  $S_2$  chiusi. Come per la prova precedente, ad un polo casuale viene applicata la corrente continua, ad un secondo polo viene invece applicata la corrente differenziale pulsante unidirezionale con un angolo di ritardo  $\alpha = 0^\circ$ . Tale corrente viene aumentata gradualmente, partendo da un valore pari a  $0.2 I_{\Delta n}$  fino al valore  $1.4 I_{\Delta n}$  per dispositivi aventi

$I_{\Delta n} > 0.01$  A e fino al valore  $2 I_{\Delta n}$  per dispositivi aventi  $I_{\Delta n} \leq 0.01$  A entro 30 s. In entrambi i casi l'interruttore deve intervenire prima che la corrente differenziale raggiunga il proprio massimo.

- Correnti differenziali provenienti da circuiti raddrizzatori: i dispositivi del tipo B devono garantire protezione anche in caso di correnti continue o pulsanti unidirezionali provenienti da raddrizzatori. Si considera allora il caso in cui il raddrizzatore è alimentato da due fasi, occorre utilizzare il circuito di Fig. 53a, con l'interruttore differenziale e gli interruttori  $S_1$  ed  $S_2$  chiusi. Il circuito di prova è collegato a due morsetti scelti casualmente dell'interruttore differenziale, a cui viene fornita una corrente differenziale gradualmente crescente, dal valore iniziale di  $0.2 I_{\Delta n}$  al valore  $2 I_{\Delta n}$  entro 30 s. La prova viene eseguita due volte per ciascuna posizione I e II di  $S_3$ , l'interruttore deve intervenire entro l'intervallo  $[0.5 I_{\Delta n} ; 2 I_{\Delta n}]$ .



**Fig. 53:** Circuiti di prova per interruttore del tipo B per correnti differenziali da raddrizzatori

Una seconda serie di prove viene effettuata per misurare la durata dell'interruzione, stabilendo la corrente differenziale tramite la chiusura di  $S_2$ . Vengono eseguite due misure per tre valori della corrente differenziale scelti a caso dalla Tab. 14, per ogni posizione I e II

di  $S_3$ : la durata non deve superare i valori corrispondenti.

Tipo	$I_n$ [A]	$I_{\Delta n}$ [A]	Valori normali di durata d'interruzione e di non intervento [s] ad una corrente differenziale di intervento ( $I_{\Delta}$ ) uguale a				
			$2 I_{\Delta n}$	$4 I_{\Delta n}$	$10 I_{\Delta n}$	5 A, 10 A, 20 A, 50 A, 100 A, 200 A	
Generale	Qualsiasi valore	Qualsiasi valore	0,3	0,15	0,04	0,04	Durata massima di interruzione
S	$\geq 25$	$> 0,030$	0,5	0,2	0,15	0,15	Durata massima di interruzione
			0,13	0,06	0,05	0,04	Durata minima di non intervento

Tab. 14: Valori normali di durata d'interruzione e di non intervento per correnti differenziali continue provenienti da circuiti raddrizzatori e per corrente differenziale continua senza ondulazioni

Questa prova si esegue, escludendo gli interruttori differenziali bipolari, anche considerando circuiti raddrizzatori alimentati da tre fasi: si utilizza il circuito di Fig. 53b. La procedura è la medesima, l'unica differenza risiede nella scelta delle correnti differenziali per la misura della durata dell'interruzione: anziché scegliere casualmente tre valori di corrente da Tab. 14, si considera  $2 I_{\Delta n}$  e si scelgono casualmente solo due valori.

- Corrente differenziale continua senza ondulazioni: il dispositivo differenziale del tipo B è l'unico dei tipi presentati dalle norme a dover esercitare la funzione di protezione anche in presenza di correnti differenziali puramente continue. Per questa prova si utilizza il circuito sotto riportato, mantenendo l'interruttore differenziale,  $S_1$  ed  $S_2$  chiusi.

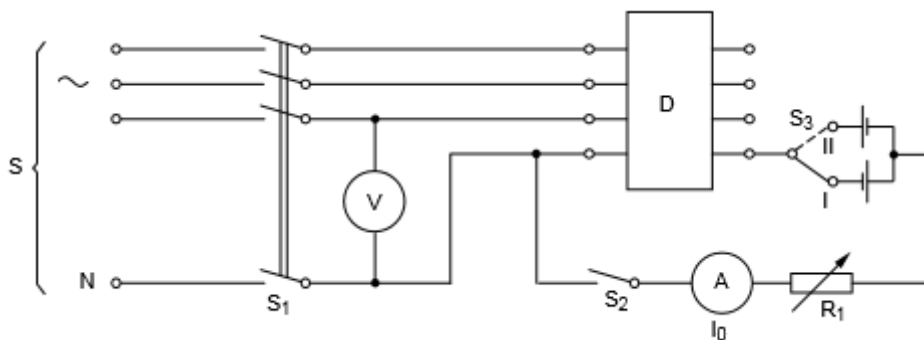


Fig. 54: Circuito di prova per interruttore differenziale di tipo B per la verifica del corretto funzionamento nel caso di corrente differenziale continua senza ondulazioni

La corrente differenziale continua viene applicata ad un polo qualsiasi dell'interruttore differenziale, e cresce gradualmente dal valore  $0.2 I_{\Delta n}$  al valore  $2 I_{\Delta n}$  entro 30 s. Si esegue la prova due volte per ogni posizione I e II dell'interruttore ausiliario  $S_3$ , misurando la corrente di intervento: si considera la prova superata se tale corrente è compresa tra  $0.5 I_{\Delta n}$  e  $2 I_{\Delta n}$ .

Si esegue una seconda prova per misurare la durata dell'intervento: si regola il circuito successivamente a ciascun valore della corrente differenziale di intervento indicato nella Tab. 14 escludendo l'ultima colonna, mantenendo chiusi l'interruttore differenziale ed  $S_1$ . La chiusura di  $S_2$  stabilisce improvvisamente la corrente differenziale. La durata di interruzione viene eseguita due volte per ciascuna corrente differenziale indicata dalla tabella, con  $S_3$  posizionato casualmente. La prova si considera superata se i tempi misurati rispettano quelli di Tab. 14.

Le due prove a corrente differenziale continua senza ondulazioni appena illustrate, al contrario delle precedenti, devono essere eseguite anche a carico: si ripetono perciò entrambe caricando l'interruttore differenziale alla corrente nominale come durante il normale servizio per un tempo sufficientemente lungo al raggiungimento delle condizioni di regime termico.

Le prove illustrate sono quelle previste dalle norme vigenti al fine di verificare il corretto funzionamento dei dispositivi differenziali in presenza delle correnti e del campo di frequenze per cui sono tenuti a operare.

Negli studi presentati nel Capitolo 2 sono stati effettuati, oltre a simulazioni tramite adeguati software, esperimenti su interruttori differenziali forniti da diversi costruttori, e quindi conformi alle norme. Ciò nonostante, tali dispositivi non hanno sempre dimostrato un corretto funzionamento. Questo è spiegabile dal fatto che, come è possibile verificare dallo studio delle prove illustrate, le correnti che devono essere sottoposte agli interruttori durante le prove previste dalle norme che ne regolano il funzionamento hanno forme d'onda standard, mentre le correnti differenziali reali sono spesso soggette a distorsioni che, come dimostrato nel Capitolo 2, sono inclini a causare lo scatto intempestivo degli interruttori automatici differenziali. La sola prova prevista dalle norme per evitare gli interventi intempestivi dei dispositivi è quella della “*Resistenza agli interventi intempestivi dovuti ad impulsi di corrente*”, già illustrata al termine del prece-

dente Capitolo, che non può di conseguenza ritenersi sufficiente a garantire l'assenza degli interventi impestivi.





## **CONCLUSIONI**

Nell'elaborato è stata fornita una panoramica sullo stato dell'arte degli interruttori automatici differenziali. Ne è stata illustrata la funzione di protezione e specificato, servendosi delle curve di sicurezza corrente-tempo, quando essa può essere svolta anche per contatti diretti; sono stati evidenziati diversi metodi di classificazione previsti dalle norme e distinte le varie tipologie stabilite da tali classificazioni, descrivendo le caratteristiche di ognuna.

Dopo aver illustrato il principio di funzionamento di un dispositivo differenziale ideale, se ne è analizzato il comportamento presentando diversi studi ed esperimenti nei quali sono state simulate condizioni di funzionamento realistiche attraverso l'uso di correnti distorte, rilevando diverse condizioni in cui gli interruttori differenziali testati sono intervenuti con modalità ben diverse da quelle ideali. Trascurando sovratensioni dovute a fulminazioni o a manovre nella rete, le quali sono state illustrate in un secondo momento, è stato possibile attribuire principalmente la “colpa” di tali malfunzionamenti alla non idealità della corrente di rete, ossia alla distorsione dovuta alla presenza di carichi non lineari, filtri, azionamenti con convertitori di frequenza ed altri componenti di elettronica di potenza, i quali introducono componenti armoniche nella corrente di rete.

Attraverso l'analisi del comportamento dell'interruttore differenziale in presenza di corrente con una componente armonica di basso ordine ed in presenza di corrente con una componente armonica di elevato ordine è stato possibile ricavare che l'ordine della componente armonica influenza molto l'intervento dell'interruttore differenziale distorcendo in maniera differente l'andamento nel tempo delle forze magnetiche nel relè, indipendentemente dal tipo del dispositivo differenziale. Componenti armoniche di basso ordine con basse ampiezze relative influenzano leggermente la sensibilità del dispositivo in base allo sfasamento dell'armonica rispetto alla componente fondamentale: se le due componenti sono in fase si ha una lieve diminuzione della sensibilità, uno sfasamento di  $180^\circ$  ne comporta invece un lieve aumento. Per componenti armoniche di ordine elevato lo sfasamento non è invece particolarmente influente: esse comportano una distorsione notevole dell'andamento delle forze magnetiche anche in caso di sfasamento nullo. Dunque l'influenza sul comportamento del dispositivo dovuta alle componenti armoniche di basso ordine è fortemente legato principalmente all'angolo di fase di queste, mentre l'influenza delle

armoniche di elevato ordine non è regolato dallo sfasamento ma dalla loro ampiezza. Considerando una corrente con più componenti armoniche si è ricavato che con la componente del 3° ordine in fase con la fondamentale si ha una forma d'onda piatta, mentre con la componente del 3° ordine sfasata di 180° si ha una forma d'onda appuntita, e l'interruttore differenziale apre il circuito per una corrente di guasto dal valore efficace minore.

Si è poi considerato l'impatto della velocità di un motore utilizzatore e della modulazione PWM sul comportamento degli interruttori differenziali. Si è ricavato che basse velocità del motore comportano l'aumento del valore della corrente d'innescò e quindi la presenza di eventuali situazioni pericolose dovute ad un intervento tardivo dell'interruttore, senza che venga perciò rispettata la curva di sicurezza. Per basse velocità del motore la componente di corrente dovuta alla modulazione PWM assume un'importanza rilevante e si ha che al crescere della frequenza della modulazione PWM cresce il valore della corrente d'innescò. Sarebbe dunque opportuno evitare basse velocità del motore ed elevate frequenze della modulazione PWM, ma ciò ridurrebbe l'efficacia della modulazione in maniera inaccettabile.

Durante gli studi presentati sono stati trascurati gli effetti dovuti alla saturazione, alla magnetizzazione e alle perdite nel nucleo, i quali introducono effetti che si contrappongono con alcuni aspetti visti: la saturazione del nucleo, spesso causata da correnti con forme d'onda appuntite, comporta un aumento della corrente d'innescò del dispositivo differenziale, mentre magnetizzazione e perdite nel nucleo, entrambe causate dalla presenza di armoniche di ordine elevato, comportano rispettivamente un aumento ed una diminuzione della sensibilità dell'interruttore differenziale.

È stato quindi affrontato il problema dal punto di vista normativo, esaminando le prove previste dalle norme al fine di garantire il corretto funzionamento dei dispositivi differenziali. Esse richiedono un'unica prova al fine di garantire l'immunità dagli interventi intempestivi, ossia la prova di tenuta all'onda oscillatoria ring wave e la prova di tenuta all'impulso di corrente 8 / 20  $\mu$ s, la quale deve essere superata unicamente dai dispositivi di tipo selettivo S. Le altre numerose prove di verifica del corretto funzionamento dei dispositivi indicate dalle norme prevedono l'utilizzo di correnti di forma d'onda standard, per cui non sono utili dal punto di vista dell'immunità all'intervento intempestivo dovuto a correnti distorte. Vista la complessità dell'argomento, causata dai numerosi fattori in gioco quali diversità dell'influenza delle componenti armoniche in base al loro ordine, influenza della velocità del motore e impatto della componente alla frequenza di

modulazione PWM in funzione della velocità del motore, effetti di saturazione, magnetizzazione e perdite del nucleo, è auspicabile un aggiornamento delle norme che introduca provvedimenti al fine di ottenere immunità dagli interventi intempestivi con maggiori garanzie.

Sono infine stati illustrati alcuni esempi di interruttori differenziali in commercio i quali garantiscono una maggior immunità agli scatti intempestivi attraverso l'introduzione di un lieve ritardo dell'intervento il quale, pur rispettando i tempi d'intervento previsti dalle norme, permette agli interruttori di tipo generale di superare la prova di tenuta all'impulso di corrente 8 / 20  $\mu$ s, prevista per i soli dispositivi di tipo selettivo S. Il principio di funzionamento di questi dispositivi è il rimedio ad oggi più efficace contro gli interventi intempestivi, argomento tutt'ora al centro di ricerche e analisi a causa della sua difficoltà di studio.



## **BIBLIOGRAFIA**

- Xiang Luo, Y. Du, X. H. Wang, and M. L. Chen , “Tripping Characteristics of Residual Current Devices Under Nonsinusoidal Currents”, 2011
- Fabio Freschi, “High-Frequency Behavior of Residual Current Devices”, 2012
- Stanislaw Czapp, “The Impact of Higher-Order Harmonics on Tripping of Residual Current Devices”, 2008
- Stanislaw Czapp, “The Effect of Earth Fault Current Harmonics on Tripping of Residual Current Devices”, 2008
- Stanislaw Czapp, “The Effect of PWM Frequency on the Effectiveness of Protection Against Electric Shock Using Residual Current Devices”, 2010
- Yu Xiang, V. Cuk, J.F.G. Cobben, “Impact of Residual Harmonic Current on Operation of Residual Current Devices”, 2011
- CEI EN 61008-1: Interruttori differenziali senza sganciatori di sovracorrente incorporati per installazioni domestiche e similari Parte 1: Prescrizioni generali, 2014
- CEI EN 61008-1/A2: Interruttori differenziali senza sganciatori di sovracorrente incorporati per installazioni domestiche e similari Parte 1: Prescrizioni generali, 2015
- CEI EN 61009-1: Interruttori differenziali con sganciatori di sovracorrente incorporati per installazioni domestiche e similari Parte 1: Prescrizioni generali, 2014
- CEI EN 62423: Interruttori differenziali di Tipo F e B con e senza sganciatori di sovracorrente incorporati per installazioni domestiche e similari, 2013
- CEI 64-8, 7<sup>a</sup> edizione: Impianti elettrici utilizzatori a tensione nominale non superiore a 1000 V in corrente alternata e a 1500 V in corrente continua, 2012
- IEC 60479-1: Effetti della corrente sul corpo umano, 2005
- Guida alle novità della Norma CEI 64-8 7<sup>a</sup> edizione. Soluzioni ABB per gli impianti residenziali, 2012
- Schneider Electric - Guida al Sistema Bassa Tensione, 2012
- Schneider Electric - Protezione ad alta sicurezza per gli edifici residenziali, del terziario e industriali

- ABB Guida Tecnica 2103/2014 - Protezione contro guasti verso terra con gli interruttori differenziali
- SIEMENS - Interruttori Differenziali - Guida Tecnica - Ed. 2012
- SIEMENS – Interruttori Differenziali Antidisturbo, 2010
- [www.ABB.com](http://www.ABB.com)
- [www.btcino.it](http://www.btcino.it)
- [www.schneider-electric.com](http://www.schneider-electric.com)
- [www.siemens.com](http://www.siemens.com)
- [www.electromagazine.it](http://www.electromagazine.it)
- [www.electroyou.it](http://www.electroyou.it)
- [www.elektro.it](http://www.elektro.it)