

UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Ingegneria Industriale DII

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Elettrica

SCelta E DIMENSIONAMENTO DI TRASFORMATORI AMPEROMETRICI
DI PROTEZIONE IN APPLICAZIONI AT ED MT - VALUTAZIONE DEL
COMPORTAMENTO IN SATURAZIONE

Relatore: Prof. Roberto Turri

Laureando: SIMONE FARRONATO

Matricola 1033758

Anno Accademico 2019/2020

Indice

INTRODUZIONE.....	1
1 - SISTEMI DI PROTEZIONE DA SOVRACORRENTE.....	5
1.1 TRASFORMATORI DI CORRENTE DI PROTEZIONE.....	5
1.1.1 Tipologie trasformatori di corrente di protezione	11
1.1.1.1 Trasformatori amperometrici di protezione secondo IEC/CEI-EN 61869-2	13
1.1.1.2 Trasformatori amperometrici di protezione secondo IEEE C57.13	16
1.1.1.3 Correlazione tra TA secondo standard IEC/EN e secondo ANSI/IEEE.....	18
1.2 RELÈ DI PROTEZIONE	19
1.2.1 Generalità	19
1.2.2 Tipologie relè.....	20
1.2.3 Principali relè di massima corrente.....	25
1.2.3.1 Protezioni di massima corrente - codice 50-51	25
1.2.3.2 Protezioni di massima corrente direzionale codice 67	26
1.2.3.3 Protezioni di massima corrente omopolare codice 50N-51N.....	27
1.2.3.4 Protezioni di massima corrente direzionale omopolare codice 67N.....	27
1.2.3.5 Protezioni di massima corrente differenziale codice 87	29
1.3 ALTRI COMPONENTI DI UN SISTEMA ELETTRICO DI PROTEZIONE	29
2 - MODELLI ELETTRICI TEORICI E SEMPLIFICATI DEI TRASFORMATORI AMPEROMETRICI.....	31
2.1 GENERALITÀ.....	31
2.2 GENERALITÀ SUL FENOMENO DELLA SATURAZIONE	32
2.2.1 Tensione al ginocchio e di saturazione	34
2.3 CONSIDERAZIONI SUL CIRCUITO SEMPLIFICATO.....	36
2.4 MODELLO SEMPLIFICATO DELLA CARATTERISTICA DI ECCITAZIONE DEL TA.....	37
2.5 MODELLO DI CALCOLO SEMPLIFICATO	38
2.5.1 Dettagli sul modello di calcolo	38
2.5.1.1 Valutazione del flusso residuo	44
2.5.2 Modello relè digitale di massima corrente.....	45
2.5.3 Esempio caratteristiche di magnetizzazione di un TA.....	48
3 - VALUTAZIONE DI UN TRASFORMATORE AMPEROMETRICO.....	51
3.1 VALUTAZIONE INIZIALE DEL TA.....	51
3.1.1 Definizione delle caratteristiche del TA in funzione del punto d'installazione	51
3.1.2 Valutazione compatibilità del TA.....	52
3.1.3 Valutazione funzionamento del TA in zona lineare	52
3.1.4 Valutazione compatibilità con relè di protezione e circuiti di collegamento	57

3.1.5	Conduttori.....	58
3.1.6	Carico dei dispositivi di protezione	61
3.1.7	Stima tempo di saturazione:	62
3.2	FOGLIO DI CALCOLO PER LA VALUTAZIONE DEI TA.....	63
3.3	CODICE DI CALCOLO MATLAB	69
3.4	CONFRONTO DEL CODICE DI CALCOLO MATLAB CON UN TOOL COMMERCIALE.....	75
4	ESEMPI APPLICATIVI.....	78
4.1	ESEMPIO N.1	78
4.2	ESEMPIO N.2.....	86
	CONCLUSIONI.....	92
	NOMENCLATURA	95
	RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	98
	APPENDICE 1 - CODICE MATLAB.....	99

Introduzione

L'oggetto del presente documento di tesi è la scelta ed il dimensionamento di trasformatori amperometrici (TA) di protezione, in applicazioni AT ed MT, con particolare attenzione alla valutazione del comportamento in saturazione.

Lo studio è stato condotto, nell'ambito delle attività di consulenza della società SINT Ingegneria S.r.l., di Bassano del Grappa (VI), al fine di sviluppare un tool di verifica delle condizioni di saturazione del TA e dell'adeguatezza del complesso TA / relè di protezione / elementi ausiliari.

Si evidenzia che in commercio risultano attualmente disponibili diversi tool di verifica, quali ad esempio:

- modulo di calcolo di verifica dei TA del software NEPLAN Electricity – prodotto da NEPLAN AG;
- foglio di calcolo EXCEL® denominato “CT-SATuration CALCULATOR” – prodotto da “ERLPhase”;
- CTDim “Current and voltage transformer selection, dimensioning and simulation” – prodotto da “SIEMENS”.

Tuttavia, nel corso dell'esperienza professionale della società SINT Ingegneria Srl, sono state riscontrate alcune lacune funzionali o difficoltà di utilizzo nell'uso dei suddetti tool. Altri, invece, che prevedono la modellizzazione elettromagnetica dei TA, risultano troppo costosi o inutilmente complicati per gli usi normali nella quotidianità professionale.

In tale contesto la Società ha richiesto lo studio e la creazione di un software ad-hoc, che venisse sviluppato in considerazione delle effettive necessità di verifica delle prestazioni del sistema di protezione e che risultasse facilmente ampliabile con ulteriori funzioni.

La scelta del trasformatore amperometrico per protezione di massima corrente risulta di fondamentale importanza nella progettazione di un sistema di protezione.

Nell'esercizio ordinario il TA dovrà essere dimensionato per sostenere la corrente normalmente circolante nel circuito primario.

Altresì, in condizioni di sovracorrente il TA dovrà essere dimensionato per sopportare la sovracorrente ipotizzata per il circuito primario e garantirne la corretta trasformazione verso la protezione di massima corrente.

Quest'ultima condizione può risultare particolarmente critica nei casi in cui i valori delle sovracorrenti risultino molto elevati rispetto alle condizioni ordinarie e/o la costante di tempo del sistema risulti molto elevata a causa di guasto su rete fortemente induttiva.

In questi casi il TA, se non correttamente dimensionato, potrebbe funzionare in zona di saturazione e l'errore introdotto dallo stesso trasduttore, in particolari condizioni funzionali, potrebbe determinare fenomeni quali:

- l'incremento del tempo d'intervento della protezione, con l'introduzione di un ritardo nel superamento della soglia di intervento;
- il mancato intervento della protezione, in quanto il valore efficace della componente fondamentale rilevata dalla protezione stessa, non risulta superiore alla soglia d'intervento prevista.

Risulta quindi fondamentale il coordinamento dimensionale tra i componenti del sistema di protezione (TA, relè di protezione, cablaggio) in rapporto alle condizioni funzionali in regime di sovracorrente.

La condizione di saturazione del TA è inoltre intrinsecamente legata alla caratteristica del carico connesso al secondario dello stesso. Infatti, la presenza di elementi ad assorbimento ridotto (ovvero di ridotta impedenza) consente di operare in condizioni più gravose di sovracorrente, senza incorrere nel fenomeno della saturazione, rispetto alle condizioni nominali del carico definite in sede di costruzione del TA.

Pertanto, nell'ambito del presente lavoro di tesi, è stato sviluppato un foglio di calcolo per la verifica iniziale della soluzione prevista per il TA del sistema di protezione. Questo foglio di calcolo oltre a determinare l'eventuale presenza di saturazione del TA, in rapporto all'effettivo carico connesso al secondario, ne verifica le principali caratteristiche dimensionali, la compatibilità con il relè di protezione e la compatibilità con i componenti ausiliari.

Tuttavia, si sottolinea che la scelta del trasformatore amperometrico deve rispondere sia a criteri dimensionali che di carattere economico; non è quindi del tutto corretto un sovradimensionamento generico dei dispositivi, derivante dalle prime valutazioni.

La scelta del TA di protezione dovrebbe pertanto essere condotta con criteri ingegneristici volti all'ottimizzazione dimensionale ed al contempo all'affidabilità della soluzione.

Si consideri che la condizione di saturazione del TA, valutata con criteri semplificati, in alcuni casi può risultare tollerabile dal sistema di protezione, poiché l'errore introdotto potrebbe risultare ancora gestibile, in quanto il relè di protezione potrebbe intervenire comunque in tempi adeguati.

Quindi, in questo contesto, sempre nell'ambito del presente lavoro di tesi, è stato sviluppato un codice di calcolo per la simulazione semplificata del funzionamento del TA in condizioni di saturazione e la verifica delle modalità d'intervento del relè di protezione.

La normale strategia progettuale prevede che i trasformatori di corrente per la protezione delle linee di trasmissione siano comunemente scelti per evitare la saturazione nei primi cicli successivi al guasto, allorché, a causa della presenza della componente unidirezionale

aperiodica, la corrente di guasto presenta un'asimmetria rispetto all'asse temporale (si potrebbe parlare quindi di "fase asimmetrica" della massima corrente di guasto).

Ciò è tipicamente possibile nelle applicazioni di protezione in linea poiché le relative correnti di carico elevate comportano l'uso di TA ad alto rapporto; inoltre, le correnti di guasto sono generalmente limitate a valori non superiori a 15 volte il valore della corrente primaria del TA stesso. Ad esempio nella rete di trasmissione nazionale italiana a 380 [kV] è standardizzato il ricorso a TA con rapporto 3200/5, con correnti di corto circuito che tipicamente non superano i 50 [kA] (¹⁷).

Diventa più difficile evitare la saturazione dei TA di protezione nei casi in cui i trasduttori risultano, per varie ragioni, di taglia molto inferiore alla corrente di corto circuito (come per esempio nel caso di centrali con più gruppi di generazione) ed installati a distanza rilevante rispetto alle protezioni.

Ad esempio, nel caso dei trasformatori AT/MT disposti in sottostazioni che occupano aree di ampiezza elevata, è plausibile un ridotto valore della corrente nominale lato alta tensione del trasformatore, rispetto alla corrente di guasto, insieme ad una elevata lunghezza dei cavi di collegamento dal campo fino agli armadi delle protezioni; questi fattori possono quindi favorire la saturazione del TA nelle fasi transitorie del guasto.

Altro esempio, nel caso di protezione di utenze di ridotta potenza connesse ad un sistema con elevate correnti di guasto (esempio sistemi ausiliari delle centrali elettriche), il TA di protezione viene tipicamente dimensionato in rapporto alla corrente di funzionamento prevedibile per l'utenza stessa, quindi molto inferiore a quella di sistema. Pertanto, anche in questo caso è molto probabile la saturazione del TA nelle fasi transitorie del guasto.

Nel seguito, nel capitolo 1 - "Sistemi di protezione da sovracorrente", sarà introdotta una panoramica generale sullo stato attuale dei sistemi di protezione di massima corrente più comuni nell'ambito degli impianti AT ed MT.

Nello stesso capitolo saranno poi descritti i trasformatori di corrente di protezione, i relè di protezione ed i componenti ausiliari del sistema di protezione. Sarà quindi focalizzata l'attenzione sulle caratteristiche dei TA di protezione più utilizzati nell'ambito dei sistemi AT/MT. Inoltre, verranno illustrate le principali tipologie dei trasformatori amperometrici di protezione nell'ambito delle norme IEC/CEI-EN 61869-2 e della norma IEEE C57.13.

Successivamente, nel capitolo 2 - verranno presentati i "Modelli elettrici teorici e semplificati dei trasformatori amperometrici".

In questo capitolo verranno illustrati:

- il circuito elettrico semplificato del TA;
- i principi del fenomeno della saturazione del circuito magnetico dei TA ed i relativi effetti sulla tensione/corrente secondaria;

- i metodi di determinazione della tensione di ginocchio nella curva di magnetizzazione del TA;
- il modello di calcolo semplificato per la determinazione del comportamento in saturazione del TA.

Verranno quindi descritte, nel capitolo 3 - le modalità di “Valutazione di un trasformatore amperometrico”, per una scelta corretta dello stesso come parte del sistema di protezione.

Sarà illustrato un procedimento di prima valutazione per determinare l’adeguatezza del TA, in rapporto alle condizioni di sovracorrente ed alle caratteristiche del complesso di protezione (relè, collegamenti, etc.). Questi procedimenti valutativi saranno gestiti da uno specifico tool di calcolo in applicazione Windows EXCEL ®.

Nello stesso capitolo verrà successivamente descritto un codice di calcolo semplificato del comportamento del TA in condizione di saturazione, che comprende la simulazione delle modalità di campionamento del segnale da parte della protezione di massima corrente. Questo codice di calcolo è stato sviluppato in ambiente MATLAB ®.

Infine, nel capitolo 4 - saranno illustrati alcuni “Esempi applicativi” dei tool di valutazione del trasformatore amperometrico.

Per ogni esempio applicativo verranno commentati i risultati delle valutazioni, dei calcoli e verranno illustrate le eventuali modalità di risoluzione delle inadeguatezze.

1 - Sistemi di protezione da sovracorrente

In questo capitolo, al fine di meglio comprendere le indicazioni riportate nel seguito del presente documento, si propone una panoramica sulle caratteristiche dei sistemi di protezione elettrici di sovra corrente, di cui i trasformatori amperometrici risultano parte integrante fondamentale.

Il sistema elettrico di protezione, come “insieme formato da protezione, interruttore, trasduttori ed ausiliari”, risulta genericamente composto da:

- relè di protezione;
- trasformatori di tensione e di corrente;
- collegamenti elettrici d.c. ed a.c.;
- apparati di alimentazione ausiliaria;
- interruttore MT/AT (tipicamente con isolamento in vuoto o SF6);
- circuiti di comando e segnalazione.

Nel seguito, in rapporto alle finalità del presente lavoro di tesi, verrà focalizzata l’attenzione sui seguenti componenti dei sistemi di protezione elettrici di sovracorrente:

- trasformatori di corrente di protezione;
- relè di protezione;
- collegamenti elettrici tra trasformatori di corrente di protezione e relè di protezione.

Non verranno qui considerate le caratteristiche dei trasformatori voltmetrici, degli interruttori MT/AT e degli ausiliari di sistema, in quanto argomenti che esulano dall’interesse specifico del presente lavoro di tesi.

1.1 Trasformatori di corrente di protezione

I trasformatori amperometrici per protezione (nel seguito identificati dalle sigle TA o CT), sono dispositivi adatti alla misura di elevate correnti, quando l’accuratezza e la linearità non siano di primaria importanza.

La funzione principale dei trasformatori di corrente è quindi quella di ridurre le correnti, con le quali i relè di protezione dovranno operare, a valori compatibili con il livello di isolamento dei relè stessi. Essi vengono utilizzati quando le grandezze elettriche in gioco nel sistema hanno valori elevati e non permettono il collegamento diretto del sistema con il relè di protezione.

Le grandezze secondarie devono inoltre essere tali da consentire al personale di lavorare in condizioni di sicurezza.

I pregi di questa tipologia di trasduttore sono essenzialmente il costo ridotto e la facilità di impiego, mentre i difetti si possono individuare nella scarsa linearità / accuratezza e nell'impossibilità di misurare correnti continue.

Il funzionamento dei TA si basa infatti sull'accoppiamento magnetico tra due circuiti, realizzato mediante un circuito a bassa riluttanza, caratterizzato da un nucleo magnetico.

Con questa tipologia di funzionamento si conseguono i seguenti obiettivi:

- riportare al secondario, secondo un coefficiente di proporzionalità, una replica della corrente dell'avvolgimento primario;
- introdurre l'isolamento galvanico degli strumenti di misura dalla rete che alimenta i carichi.

I trasformatori amperometrici sono quindi dei dispositivi elettrici elementari, pertanto è possibile individuarne dei modelli di validità generale, che rappresentino il loro comportamento, che saranno meglio descritti nel successivo capitolo 2 - del presente documento.

Comunque, un primo modello di riferimento per la conversione che avviene in un TA risulta essere il seguente:

$$\bar{I}_p = k_r(1 + a)e^{-i\varphi_e}\bar{I}_s \quad (1.1)$$

dove si definiscono:

- \bar{I}_p e \bar{I}_s rispettivamente i fasori delle correnti primaria e secondaria del TA;
- I_{pr} e I_{sr} rispettivamente i valori delle correnti nominali, primaria e secondaria, del TA;
- k_r rapporto nominale di trasformazione, ovvero $k_r = I_{pr}/I_{sr}$;
- a coefficiente di correzione del valore nominale del fattore di trasformazione k_r ;
- φ_e ritardo della corrente primaria rispetto alla corrente secondaria.

Per come sono stati definiti, i coefficienti a e φ_e possono essere ricavati da misure sulle correnti primaria e secondaria dalle relazioni:

$$a = \frac{I_p}{I_s k_r} - 1 \text{ e } \varphi_e = \arg(\bar{I}_s) - \arg(\bar{I}_p) \quad (1.2)$$

Si intuisce che se si volesse procedere con tale metodo di caratterizzazione, le misure sui TA dovrebbero essere eseguite in condizioni ben definite, poiché diverse variabili ne potrebbero influenzare il comportamento, come ad esempio: temperatura, umidità, qualità dei collegamenti, età del componente, degrado dell'isolamento, ecc.

Per questi motivi, nell'applicazione dei TA è più comune riferirsi a parametri individuati dagli standard, come IEC/CEI EN 61869-2 ⁽¹²⁾ ed IEEE C57.13 ⁽⁷⁾.

Gli standard definiscono e impiegano un gran numero di parametri per permettere una precisa caratterizzazione delle prestazioni dei trasformatori amperometrici.

Alcuni di questi parametri sono:

- correnti nominale primaria I_{pr} e secondaria I_{sr} - sono i range di valori delle correnti primarie e secondarie sui quali si basano le misure delle prestazioni del trasformatore; è importante scegliere dei trasformatori tali che i valori di corrente che devono rilevare siano compresi nei valori nominali per assicurarsi che la misura venga effettuata in uno dei punti di lavoro per i quali il trasformatore è stato progettato;
- CL - classe di precisione – corrisponde ad una misura dell'accuratezza del componente; ovvero nella fattispecie:

$$CL = \frac{|k_r I_s - I_{pr}|}{I_{pr}} 100 \quad (1.3)$$

dove

- I_s il valore efficace della corrente misurata al secondario (alla potenza nominale);
- I_{pr} il valore efficace della corrente primaria nominale.

Dunque la classe di precisione esprime l'errore percentuale, rispetto alla corrente nominale del primario, introdotto dal trasformatore nella stima della corrente primaria nominale. La classe CL è funzione della potenza richiesta al secondario del trasformatore e viene usualmente espressa dal produttore attraverso delle tabelle, dove si evidenzia che all'aumentare della prestazione erogata la precisione del componente diminuisce.

- Il fattore di conversione k_r è il rapporto di trasformazione definito come:

$$k_r = I_{pr}/I_{sr} \quad (1.4)$$

Questo parametro può essere ricavato dall'ipotesi che ogni trasformatore ideale è tale che la somma algebrica delle potenze entranti e uscenti risulti pari a zero, quindi:

$$V_p I_p = V_s I_s \quad (1.5)$$

Nello specifico, un TA reale è progettato affinché le correnti primaria e secondaria stiano nella relazione

$$I_p N_p = I_s N_s \quad (1.6)$$

dove:

- N_p e N_s sono rispettivamente il numero di spire dell'avvolgimento primario e secondario, con rapporto $N = N_s/N_p$ il più possibile determinato e costante entro il range di funzionamento definito.
- La potenza nominale al secondario VA_r è la potenza apparente erogata dal trasformatore, alla corrente secondaria nominale, in riferimento alla quale viene indicata l'accuratezza dello strumento, per un determinato fattore di potenza; è espressa in volt-ampere e, data la corrente nominale in uscita, determina il limite superiore dell'impedenza di carico per non degradare la classe di accuratezza (si evidenzia che l'impedenza di carico tiene conto anche di quella intrinseca all'avvolgimento secondario, che dovrà essere sommata a quella delle connessioni e dello strumento di misura).

I trasformatori di corrente (TA) usati per le protezioni sono spesso di tipo toroidale a bassa reattanza di dispersione ⁽⁴⁾.

L'avvolgimento primario è tipicamente costituito da un'unica spira che passa all'interno di un nucleo di materiale ferromagnetico, attorno al quale è avvolto l'avvolgimento secondario, come riportato in Figura 1-1.

Il primario risulta quindi collegato in serie al circuito di cui si vuole misurare la corrente.

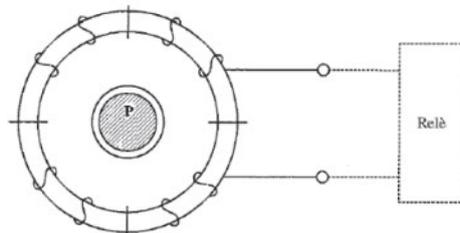


Figura 1-1 *Trasformatore di corrente toroidale*

La norma CEI EN 61869-2 definisce i requisiti che deve rispettare un trasformatore di corrente; essa introduce le definizioni di errore di rapporto, di errore d'angolo e di errore composto.

L'errore di rapporto (o di corrente) è definito come *“l'errore che un trasformatore introduce nella misura di una corrente e che ha origine quando il rapporto di trasformazione effettivo non è uguale al rapporto di trasformazione nominale”*.

L'errore di corrente espresso in percentuale è dato dalla seguente formula riportata nella norma CEI EN 61869-2 al § 3.4.3:

$$\varepsilon = \frac{(k_r I_s - I_p) 100}{I_p} \quad (1.7)$$

dove:

- k_r è il rapporto di trasformazione nominale (definito come il rapporto tra la corrente primaria nominale e la corrente secondaria nominale);
- I_p è il valore efficace della corrente primaria;
- I_s è il valore efficace della corrente secondaria.

L'errore d'angolo ($\Delta\varphi$) è definito come “la differenza di fase tra i vettori della corrente primaria e secondaria, il cui senso è tale che l'angolo sia nullo per un trasformatore ideale”.

L'errore d'angolo è ritenuto positivo quando il vettore della corrente secondaria è in anticipo sul vettore della corrente primaria.

L'errore di rapporto e l'errore d'angolo danno un'indicazione di quanto il trasformatore di corrente reale si discosti da quello ideale. Queste due definizioni sono applicabili solo in regime sinusoidale permanente.

Infine, l'errore composto, in condizioni di regime, è definito come “il valore efficace della differenza tra a) i valori istantanei della corrente primaria e b) i valori istantanei della corrente secondaria effettiva, moltiplicati per il rapporto di trasformazione nominale”.

L'errore composto (ε_c), indicato in diversi testi con (CE), espresso in percentuale, è dato dalla formula riportata nella norma CEI EN 61869-2 al § 3.4.203:

$$\varepsilon_c = \frac{100}{I_p} \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (k_r i_s - i_p)^2 dt} \quad (1.8)$$

dove:

- k_r è il rapporto di trasformazione nominale;
- I_p è il valore efficace della corrente primaria [A];
- i_p è il valore istantaneo della corrente primaria [A];
- i_s è il valore istantaneo della corrente secondaria [A];
- T è la durata del periodo [s].

Si può dimostrare che in tutte le condizioni in cui sia giustificata una rappresentazione vettoriale delle grandezze in gioco, l'errore di rapporto, l'errore d'angolo e l'errore composto formano un triangolo rettangolo, all'interno del diagramma vettoriale rappresentante le tensioni e le correnti nel trasformatore.

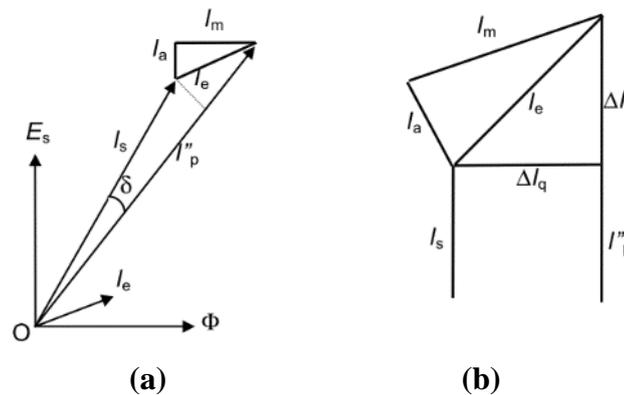


Figura 1-2 – Diagrammi vettoriali TA

In Figura 1-2 il vettore \bar{I}_s rappresenta la corrente secondaria del TA; questa corrente circola nell'impedenza dell'avvolgimento secondario del TA e nella impedenza del carico (relè di protezione e cavi di collegamento), inducendo una tensione \bar{E}_s ed un flusso di magnetizzazione $\bar{\Phi}$ (in quadratura al vettore della tensione).

Il flusso $\bar{\Phi}$ viene mantenuto dalla corrente di eccitazione \bar{I}_e , caratterizzata da una componente magnetizzante \bar{I}_m , parallela al flusso, ed una componente attiva \bar{I}_a (perdite), in quadratura al flusso. Il vettore somma delle correnti \bar{I}_s ed \bar{I}_e è il vettore \bar{I}''_p che rappresenta il valore della corrente primaria rapportato al secondario.

La definizione di errore composto può essere applicata anche in tutti quei casi in cui non è permessa una rappresentazione vettoriale delle correnti in gioco, per esempio a causa di condizioni di non linearità dovute alla saturazione del trasformatore.

In queste condizioni il valore dell'errore composto non è mai inferiore al vettore somma dell'errore di rapporto e dell'errore d'angolo.

Di conseguenza è possibile fare riferimento all'errore composto come condizione più cautelativa.

Tramite il valore dell'errore composto si può definire la classe di precisione del trasformatore di corrente di protezione come indicato al § 5.6.202 della CEI EN 61869-2.

La norma stessa CEI EN 61869-2 definisce quindi, al § 2.4.208, il fattore limite di precisione (ALF) come il “rapporto tra la corrente primaria limite di precisione nominale e la corrente primaria nominale” ovvero quel fattore che, moltiplicato per la corrente nominale primaria del TA, definisce la corrente limite di precisione nominale primaria, cioè la corrente massima fino alla quale il trasformatore rispetta le prescrizioni previste per l'errore composto.

1.1.1 Tipologie trasformatori di corrente di protezione

I trasformatori amperometrici per protezione si presentano, nell'ambito dei sistemi MT ed AT, con le seguenti classiche tipologie costruttive:

- avvolto: l'avvolgimento primario è all'interno del TA e costituito da una o più spire;
- passante: l'avvolgimento primario è costituito da un conduttore non isolato (es. barra passante);
- toroidale: avvolgimento primario è costituito da un conduttore isolato (cavo isolato MT, etc...).

Si riportano nel seguito alcune immagini relativi alle diverse tipologie di TA:

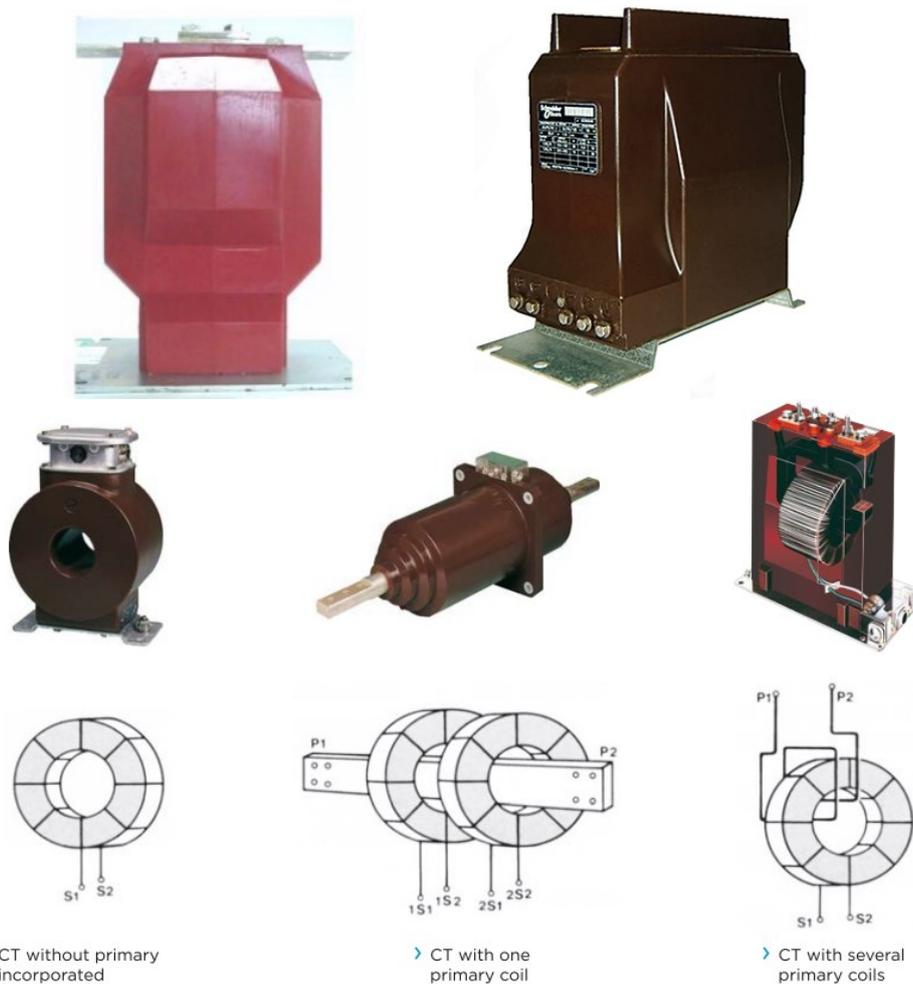


Figura 1-3 Tipologie di trasformatori di corrente per applicazioni BT / MT

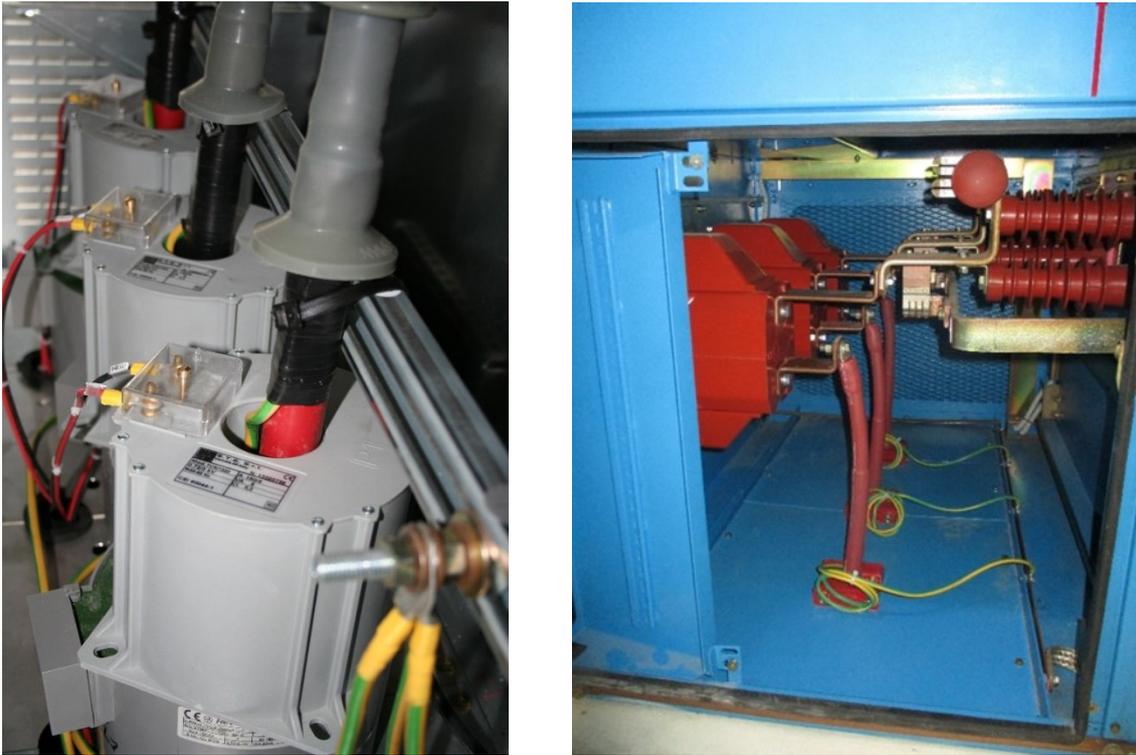


Figura 1-4 Foto di alcune installazioni di trasformatori di corrente per applicazioni MT

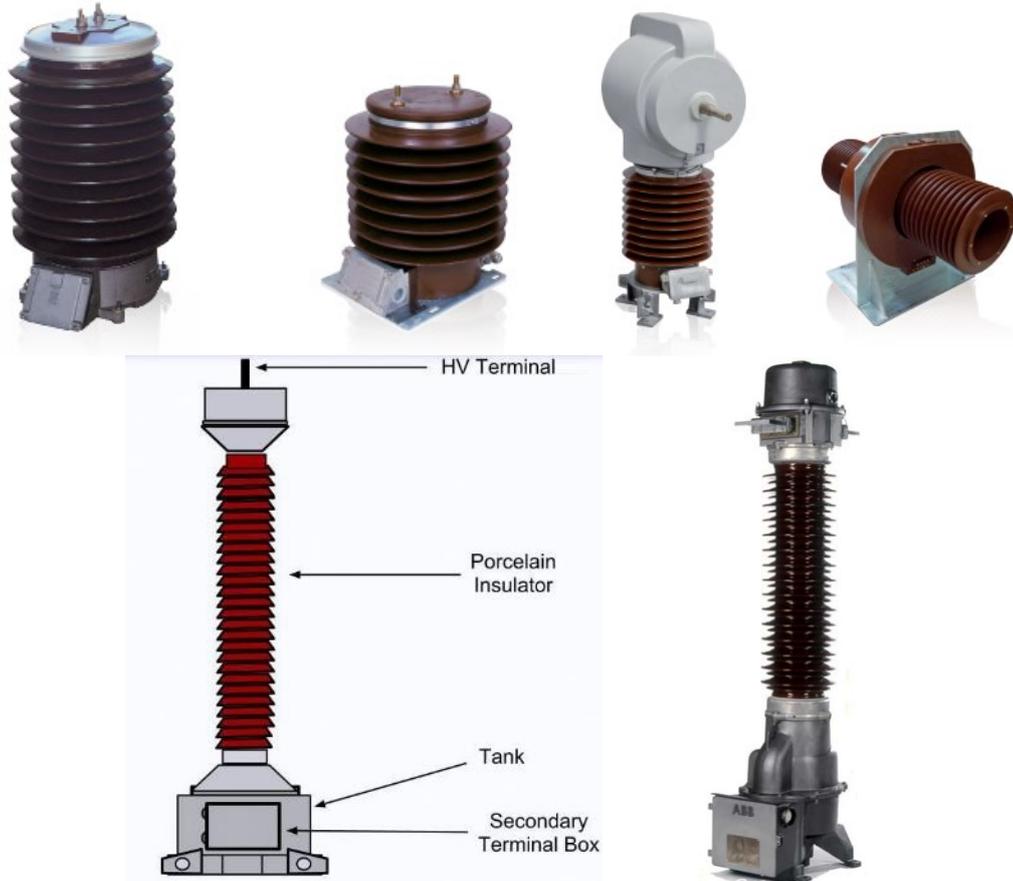


Figura 1-5 Trasformatori di corrente per applicazioni AT



Figura 1-6 Foto di alcune installazioni di trasformatori di corrente per applicazioni AT

1.1.1.1 Trasformatori amperometrici di protezione secondo IEC/CEI-EN 61869-2

La classificazione dei TA di protezione, secondo IEC/CEI EN 61869-2, è la seguente: P, PR, PX, PXR, TPX, TPY e TPZ.

Nel seguito sono descritte le caratteristiche dei TA rispetto alle suddette classificazioni.

Trasformatori amperometrici di classe P, PR

Le classi P e PR sono utilizzate per TA che rispettano le prescrizioni per l'errore composto della corrente di corto circuito in condizioni simmetriche di regime permanente.

La tipologia di TA di classe "P" è di fatto la più utilizzata per i sistemi di protezione, nelle applicazioni nell'ambito delle norme IEC (tipicamente per protezioni ANSI 50/50N, 51/51N, 67/67N, etc.).

Per questa tipologia di TA sono individuate le seguenti caratteristiche:

- errore composto;
- fattore limite di precisione (ALF). I valori normali di ALF sono 5 – 10 – 15 – 20 – 30;
- designazione delle classi di precisione: la classe di precisione viene designata utilizzando la percentuale più elevata ammessa per l'errore composto, seguita dalla lettera P e dal valore di ALF: valori normalizzati 5P /5PR e 10P/10PR (es. 5P20).

Nella seguente tabella sono individuati i limiti di errore ammessi per trasformatori di corrente di protezione delle classi P e PR.

Tabella 1-1 - Limiti di errore per i trasformatori di corrente di protezione delle classi P e PR
(Tabella 205 CEI EN 61869-2)

Classe di precisione	Errore di rapporto alla corrente primaria nominale ± %	Errore d'angolo alla corrente primaria nominale		Errore composto alla corrente limite primaria di precisione nominale %
		± Minuti	± Centiradiani	
5P e 5PR	1	60	1,8	5
10P e 10PR	3	–	–	10

In particolare, per i trasformatori di corrente di classe PR è definito il limite del flusso residuo K_r , che non deve superare il 10%, rispetto al flusso di saturazione.

Per questi trasformatori possono inoltre essere specificate:

- la costante di tempo del circuito secondario T_s ;
- la resistenza dell'avvolgimento secondario R_{ct} .

Altre indicazioni tipiche per trasformatori di classe P e PR:

- I_{th} : Corrente termica di breve durata nominale - valore tipico 40 [kA] per 1 [s], oppure 40 volte la I_{pr} ;
- I_{dyn} : Corrente nominale dinamica: tipicamente pari a $2.5 \cdot I_{th}$;
- I_{cth} : Corrente termica nominale permanente: valore tipico $1.2 \cdot I_{pr}$.

Trasformatori amperometrici di classe PX, PXR

Le classi PX e PXR sono utilizzate per TA a bassa reattanza di dispersione, per i quali la conoscenza della caratteristica di eccitazione, della resistenza dell'avvolgimento secondario, della resistenza della prestazione secondaria e del rapporto spire è sufficiente per poter valutare le loro prestazioni in relazione al tipo di sistema di protezione a relè con il quale devono essere impiegati (tipicamente adatti per protezioni di massima corrente differenziale ANSI 87).

Per questa tipologia di TA sono individuate le seguenti caratteristiche:

- F.e.m. nominale del punto di ginocchio, (E_k): è la F.e.m. sinusoidale minima (valore nominale) a frequenza nominale che, quando applicata ai terminali secondari del trasformatore con tutti gli altri terminali a circuito aperto, causa con un incremento del 10%, un aumento del valore efficace della corrente di eccitazione non superiore al 50%.
- R_{ct} : resistenza dell'avvolgimento secondario del TA riportata alla temperatura di 75°C.
- R_b : valore nominale della prestazione resistiva del circuito secondario collegato al TA, espressa in [Ω].
- I_e : limite superiore della corrente di eccitazione in corrispondenza della f.e.m. nominale del punto di ginocchio e/o di una sua percentuale dichiarata.

Inoltre:

- per la classe PX, l'errore di rapporto spire non deve superare il ± 0.25 %;
- per la classe PXR, l'errore di rapporto spire non deve superare il ± 1 %;
- per la classe PXR, il fattore residuo K_r non deve superare il 10 %.

Per i trasformatori di classe PX è presente:

- K_x : fattore di dimensionamento, utilizzato per indicare il multiplo della corrente secondaria nominale (I_{sr}) che si presenta in condizioni di guasto, che include i margini di sicurezza, per la quale il trasformatore deve soddisfare ancora i requisiti di prestazione.

In questo caso il valore della f.e.m. del punto di ginocchio può essere calcolato con:

$$E_k = K_x \cdot (R_{ct} + R_b) \cdot I_{sr} \quad (1.9)$$

Trasformatori amperometrici di classe TPX, TPY, TPZ

Le classificazioni TPX, TPY, TPZ (secondo IEC 61869-2) sono assegnate a TA che rispettino le prescrizioni per l'errore transitorio in condizioni di corrente di cortocircuito asimmetrico (la sigla T indica "transient") ed in particolare:

- TPX: sono TA senza traferro, ma con sufficiente sezione del nucleo per rispondere correttamente durante il periodo transitorio. Il TA ha una costante tempo (T_s) maggiore rispetto alla costante tempo (T_p) del sistema; (T_s può assumere valori dell'ordine dei 10 [s]).
- TPY: sono TA con traferro per ridurre induzione residua. Il TA ha una costante tempo (T_s) in funzione del grado di precisione richiesto (tipicamente può variare tra 0.3 e 1 [s]).
- TPZ: sono TA con traferro maggiore rispetto alla tipologia TPY. Questa tipologia di TA permette una corretta trasformazione della componente alternata, ma non della componente continua. Il TA ha una costante tempo (T_s) dell'ordine dei 0.07 [s].

Questi TA di classe TPX, TPY, TPZ possono essere utilmente considerati nel caso di protezioni di linea per cicli di lavoro C-O-C-O.

Per questa tipologia di TA sono individuate le seguenti caratteristiche:

- K_r : fattore residuo - rapporto di flusso residuo rispetto al flusso di saturazione, espresso come percentuale.
- K_{td} : fattore di dimensionamento del transitorio - utilizzato per tenere conto dell'aumento del flusso concatenato del secondario, dovuto alla componente in corrente continua della corrente primaria di corto circuito.
- T_s : costante di tempo del circuito secondario - valore della costante di tempo del circuito secondario del trasformatore di corrente, espressa come rapporto tra l'induttanza di magnetizzazione/dispersione (L_s) e la resistenza del circuito secondario (R_s).
- R_b : valore nominale della prestazione resistiva del carico, collegato al secondario del TA espressa in Ohm.

Nella seguente tabella sono individuati i limiti di errore per trasformatori di corrente di protezione delle classi TPX, TPY, TPZ.

Tabella 1-2 - *Limiti di errore per i trasformatori di corrente TPX, TPY e TPZ*
(Tabella 206 CEI EN 61869-2)

Classe	Alla corrente primaria nominale			Limiti di errore nel transitorio in condizioni di un ciclo di lavoro specificato
	Errore di rapporto ±%	Errore di fase		
		Minuti	Centiradiani	
TPX	0,5	±30	±0,9	$\hat{\varepsilon} = 10 \%$
TPY	1,0	±60	±1,8	$\hat{\varepsilon} = 10 \%$
TPZ	1,0	180±18	5,3±0,6	$\hat{\varepsilon}_{ac} = 10 \%$

Per trasformatori di classe TPY, l'errore transitorio $\hat{\varepsilon}$ è definibile con la seguente formula:

$$\hat{\varepsilon} = \frac{K_{td}}{2\pi f_r \cdot T_s} 100 \quad (1.10)$$

Inoltre:

- Per la classe TPY e TPZ, il fattore residuo K_r non deve superare il 10 %.

1.1.1.2 Trasformatori amperometrici di protezione secondo IEEE C57.13

La classificazione dei TA di protezione secondo IEEE C57.13, è la seguente: C, K, T, X.

In particolare:

- classe C: questa tipologia di trasformatori di corrente di protezione è assimilabile ai TA di classe P secondo IEC/CEI EN 61869-2; nei TA con questa classificazione il flusso di dispersione nel nucleo non ha un effetto apprezzabile sul rapporto di trasformazione, entro i limiti definiti nella seguente Tabella 1-3, con carichi standard definiti nella seguente Tabella 1-4. Questa classe di TA è di fatto la più utilizzata per i sistemi di protezione, nelle applicazioni nell'ambito delle norme IEEE (tipicamente per protezioni ANSI 50, 51, 67, etc.);
- classe K: come per la classificazione C ma con tensione E_k nel punto di ginocchio non inferiore al 70% della tensione nominale del terminale secondario (definita V_b secondo IEEE C57.15);
- classe T: nei trasformatori di corrente con questa classificazione il flusso di dispersione ha un effetto apprezzabile sul rapporto di trasformazione, entro i limiti definiti nella Tabella 1-3, con carichi standard definiti nella seguente Tabella 1-4, tuttavia in tal modo non risulta semplice calcolare il rapporto;

- classe X: in questa classificazione le caratteristiche del TA sono definite dall'utente, per specifiche condizioni di requisiti minimi di eccitazione secondaria. Potranno quindi essere definite:
 - V_k la tensione minima al ginocchio;
 - I_k la massima corrente di eccitazione in V_k ;
 - R_{ct} la massima resistenza ammissibile, misurata in corrente continua, dell'avvolgimento secondario corretta a 75 [°C].

L'errore di rapporto, alla corrente nominale, deve risultare entro i limiti definiti dalla seguente tabella:

Tabella 1-3 – Limiti d'errore alla corrente per TA di classe C, T, X

Relay class	Limits of ratio error	
	@ rated current	@ 20 times rated current
C and T classification	3% ^a	10%
X classification	1%	user defined

Tabella 1-4 - Carichi standard per TA

Burdens	Burden designation ^b	Resistance (Ω)	Inductance (mH)	Impedance (Ω) ^c	Total Power (VA at 5 A)	Power Factor	Terminal Voltage
Relaying burdens	B-0.1	0.09	0.116	0.1	2.5	0.9	10
	B-0.2	0.18	0.232	0.2	5.0	0.9	20
	B-0.5	0.45	0.580	0.5	12.5	0.9	50
	B-1.0	0.50	2.300	1.0	25.0	0.5	100
	B-2.0	1.00	4.600	2.0	50.0	0.5	200
	B-4.0	2.00	9.200	4.0	100.0	0.5	400
	B-8.0	4.00	18.400	8.0	200.0	0.5	800

^a If a current transformer secondary winding is rated at other than 5 A, the equivalent burden shall be derived by dividing the secondary terminal voltage by ($I_s \times 20$). For example, if the rated secondary current is 1 A and the relay class is C100, then the corresponding burden to develop the secondary terminal voltage would be $100 \text{ V} / (1 \text{ A} \times 20) = 5 \text{ } \Omega$.

^b These standard burden designations have no significance at frequencies other than 60 Hz.

^c The impedance tolerance is +5% and -0%.

Si riporta nel seguito un esempio tipico di TA di classe C200 - IEEE C57.13.

La classe C richiede:

- errore di rapporto inferiore al 3%, alla corrente nominale;
- errore di rapporto inferiore al 10%, a 20 volte la corrente nominale;
- carico standard $200 \text{ [V]} / (5 \text{ [A]} \times 20) = 2 \text{ [}\Omega\text{]}$.

In questo esempio il TA di classe C deve mantenere il valore efficace della tensione secondaria (V_b), nelle condizioni limite di 20 volte la corrente nominale e carico standard, entro il valore nominale indicato dopo la "C", che in questo caso vale 200 [V].

1.1.1.3 Correlazione tra TA secondo standard IEC/EN e secondo ANSI/IEEE

Nel seguito verrà illustrato un semplice metodo per la determinazione della correlazione tra TA di classe C secondo IEEE C57.13 e TA di classe P secondo CEI EN 61869-2.

Come già accennato in precedenza, queste tipologie di TA sono di fatto le più utilizzate nei sistemi di protezione di sovracorrente.

Innanzitutto, secondo la specifica IEEE C57.13 (7), i TA di protezione classe C sono generalmente caratterizzati dalla seguente classificazione standard: C50, C100, C200, C400, C800.

Con questa classificazione, il valore seguente alla sigla C definisce la tensione nominale, in termini di tensione utile ai terminali del TA, per la quale il valore relativo dell'errore composto (ε_c) non deve eccedere il 10%, con correnti fino a 20 volte la I_{sr} , considerando un carico standard definito nella Tabella 1-4.

Si consideri inoltre che, nei TA di classe C, la tensione di ginocchio (V_k) risulta sempre inferiore rispetto alla tensione di ginocchio (E_k), definita secondo gli standard IEC.

Questo accade poiché nello standard IEEE la tensione V_k è definita in termini di tensione utile ai terminali del TA, mentre nello standard IEC la tensione E_k non considera la caduta di tensione sulla resistenza secondaria del TA (R_{ct}). Quindi, la tensione IEC E_k risulta tipicamente dell'ordine del 5% maggiore rispetto alla IEEE V_k .

Con questa ultima considerazione, la tensione V_b (ovvero C rating) è definibile empiricamente con la seguente:

$$V_b = [E_k - (I_{sr} \cdot R_{ct} \cdot ALF)]/1.05 \quad (1.11)$$

con I_{sr} corrente nominale del TA, sempre 5A nel caso di TA standard IEEE. Si consideri inoltre che ALF nei TA di classe C è sempre pari a 20 volte la I_{sr} .

Pertanto la suddetta equazione si semplifica nella:

$$V_b = [E_k - (100 \cdot R_{ct})]/1.05 \quad (1.12)$$

Quindi, considerando TA di classe P con $ALF=20$, $I_{sr} = 5$ [A], conoscendo la tensione di ginocchio IEC E_k ed applicando la precedente equazione si perviene alla V_b che risulta correlata al più prossimo valore della classe C (IEEE).

Esempio: considerando un TA di classe 10P20 (IEC/EN), con $R_{ct} = 0.04$ [Ω] ed $E_k = 100$ [V], il corrispettivo TA di classe C (IEEE) avrà $V_b = 91.43$ [V], assimilabile ad un TA di classe C100.

In mancanza dei dati costruttivi di un TA, si può procedere alla rapida determinazione della E_k con la seguente formula empirica:

$$E_k = ALF \cdot I_{sr} \left(R_{ct} + \frac{VA_r}{I_{sr}^2} \right) \cdot 0,8 \quad (1.13)$$

Un secondo esempio: considerando un TA 200/5 di classe 10P20 (IEC/EN), con $R_{ct} = 0.08 [\Omega]$ e $VA_r = 20 [VA]$, la tensione di ginocchio E_k sarà pari a 70.4 [V]; il corrispettivo TA di classe C (IEEE), avrà $V_b = 59.4 [V]$ e sarà in questo caso necessario considerare un TA di classe C100.

Si riporta nel seguito una tabella di confronto tra le caratteristiche della tensione di ginocchio E_k IEC ed il corrispettivo TA di classe C secondo IEEE:

Tabella 1-5 – Confronto tra tensione di ginocchio E_k IEC e TA di classe C IEEE

TA	R_{ct} [Ω]	IEEE C57.13 – “C” Classification				
		C50	C100	C200	C400	C800
I_{pr}/I_{sr}		E_k	E_k	E_k	E_k	E_k
100/5	0.04	56.5	109	214	424	844
200/5	0.08	60.5	113	218	428	848
400/5	0.16	68.5	121	226	436	856
800/5	0.32	84.5	137	242	452	872
1000/5	0.4	92.5	145	250	460	880
1500/5	0.6	112.5	165	270	480	900
2000/5	0.8	132.5	185	290	500	920
3000/5	1.2	172.5	225	330	540	960

1.2 Relè di protezione

1.2.1 Generalità

Secondo la descrizione proposta dall'IEEE, un relè si definisce come “un dispositivo elettrico progettato per reagire in un determinato modo alle condizioni in ingresso e che, successivamente al verificarsi di condizioni specifiche in ingresso, deve provocare un cambiamento allo stato dei contatti di un circuito elettrico associato” ⁽¹⁰⁾.

Gli ingressi dei relè sono solitamente di tipo elettrico, ma possono anche essere di tipo meccanico, termico, o una combinazione di questi.

La definizione di relè è quindi del tutto generale e può riferirsi a qualunque dispositivo che provoca predeterminati cambiamenti alle grandezze elettriche, in uscita, quando si verificano particolari cambiamenti alle grandezze in ingresso.

Per le applicazioni di cui all'oggetto del presente documento, sono considerati i soli relè elettrici.

In questi relè sia le grandezze in ingresso che quelle in uscita sono di tipo elettrico (quali ad esempio correnti, tensioni, ecc.).

Il cambiamento dello stato delle grandezze elettriche in uscita è tipicamente conseguente alla chiusura o all'apertura di uno o più contatti elettrici associati all'uscita stessa.

1.2.2 Tipologie relè

In base al loro principio di funzionamento, i relè elettrici possono essere classificati con le seguenti tipologie:

- relè elettromeccanici;
- relè statici;
- relè numerici (o digitali).

Sempre con riferimento alle applicazioni in oggetto, l'IEEE definisce come relè di protezione un *“relè la cui funzione è quella di rilevare linee o apparati difettosi o condizioni di funzionamento anomale o pericolose di un sistema elettrico e di mettere in pratica delle procedure di controllo idonee”*.

I relè di protezione sono inoltre dispositivi normalmente presenti in qualsiasi sistema elettrico. Questi dispositivi non risultano correlati al funzionamento ordinario dell'impianto associato ma la loro necessità emerge solo in caso di condizioni funzionali (eventi) di anomalia o di pericolo.

Sono quindi apparecchi destinati a provocare predeterminati cambiamenti di stato, nei circuiti elettrici d'uscita, nel caso si verificano particolari condizioni anomale nei loro circuiti elettrici di entrata. Inoltre, lo scopo dei relè di protezione non è quello di prevenire l'insorgenza di un evento, ma quello di intervenire nel minor tempo possibile ad evento in corso.

Attualmente, per l'applicazione AT/MT, sono in uso relè digitali a microprocessore che si basano sul campionamento dei segnali analogici di ingresso, che successivamente vengono trattati attraverso opportune filtrazioni ed algoritmi (es. DFT).

Questi relè digitali consentono numerose funzioni di controllo del sistema elettrico, compresa la sorveglianza remota tramite protocolli di comunicazione standardizzati, la registrazione cronologica degli eventi (funzione RCE), oscillografia, funzioni di autodiagnostica (watch-dog), etc.

Dal punto di vista dall'alimentazione e comando degli interruttori, i relè di protezione possono essere classificati con le seguenti macro categorie:

- relè diretti;
- relè indiretti;
- relè autoalimentati.

Come relè diretti si intendono dispositivi di protezione che vengono applicati direttamente agli interruttori automatici e comprendono:

- funzione di rilevamento del guasto;
- funzione di comando di apertura dell'interruttore, con alimentazione dei dispositivi di apertura proveniente dallo stesso relè.

Come relè indiretti s'intendono dispositivi con azione indiretta verso gli interruttori automatici, con:

- funzione di rilevamento del guasto;

- funzione di comando di apertura dell'interruttore, con alimentazione dei dispositivi di apertura proveniente da sorgente ausiliaria.

Infine con relè autoalimentati si intendono dispositivi la cui energia per il funzionamento e l'intervento della protezione è derivata direttamente dai TA di protezione. Tipicamente, il circuito di autoalimentazione attraverso i TA permette il funzionamento del relè con corrente superiore a $0.2 \times I_n$ su almeno una fase.

Altresì, dal punto di vista della modalità di rilevazione delle grandezze elettriche, i relè sono anche definibili come:

- relè primari, che rilevano direttamente le grandezze elettriche da controllare;
- relè secondari, che rilevano le grandezze elettriche da controllare tramite opportuni trasduttori di misura, che ne riducono/modificano i valori in funzione delle necessità del sistema di protezione.

Infine, dal punto di vista della tipologia dei dispositivi di protezione, i relè si caratterizzano in:

- relè a tempo indipendente (o definito): queste protezioni agiscono con un ritardo costante indipendentemente dal valore della grandezza controllata (si veda nella figura seguente la curva rossa). Per i relè di corrente la caratteristica di intervento assume la forma $I \cdot t = k$;
- relè a tempo dipendente (inverso): queste protezioni agiscono con tempo in funzione del valore della grandezza di riferimento (si veda nella seguente figura la curva viola)

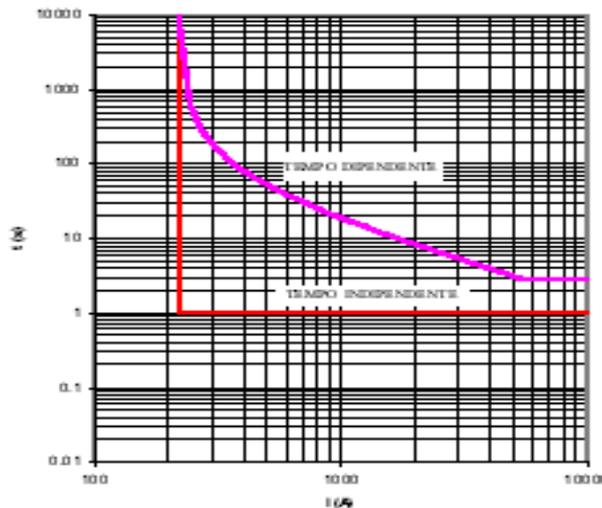


Figura 1-7 Rappresentazione curve tempo dipendente ed indipendente

I relè di protezione di massima corrente a tempo inverso sono ulteriormente caratterizzati in:

- relè a tempo normalmente o semplicemente inverso (NI, SI);
- relè a tempo molto inverso (VI);
- relè a tempo estremamente inverso (EI);

con curve funzionali definite in sede IEC (norma EN 60255-4) e basate sull'espressione generale:

$$t = \frac{K}{(I/I_1)^m - 1} \quad (1.14)$$

dove I_1 è la corrente di soglia ed i valori di K e di m sono stati scelti in modo da avere le seguenti relazioni:

- tempo NI: $K = 0.14$; $m = 0.02$
- tempo VI: $K = 13,5$; $m = 1$
- tempo EI: $K = 80$; $m = 2$

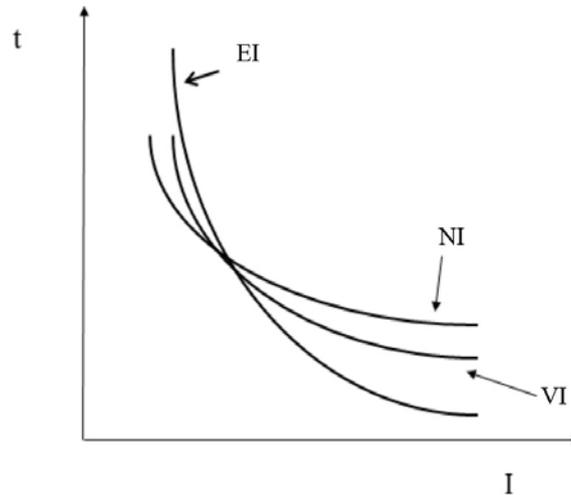


Figura 1-8 *Rappresentazione curve tempo inverso, molto inverso, estremamente inverso*

Altre caratteristiche tipologiche dei relè di protezione sono:

- relè non direzionali: il funzionamento si basa esclusivamente sulla comparazione della grandezza misurata rispetto al valore di soglia impostato. Il superamento di una soglia da parte della grandezza misurata determina l'avviamento della protezione. Qualora il valore di azione della grandezza di riferimento permanga per il tempo d'intervento impostato, il relè emette il comando di scatto;
- relè direzionali: questi relè sono complessi di misura basati sulla potenza (wattmetrici, varmetrici) in cui la tensione è usata come riferimento per stabilire la direzione e la fase della corrente di guasto. L'intervento del relè è determinato dalla comparazione tra le grandezze misurate (tensione e corrente) in valore assoluto e l'angolo di sfasamento tra le stesse ed i valori di soglia impostati.

Nella normativa ANSI/IEE C37.2 sono codificate le principali caratteristiche funzionali dei relè di protezione

Si riporta nel seguito un estratto della ANSI/IEE C37.2 con particolare riferimento alle protezioni di massima corrente:

Tabella 1-6 – Estratto ANSI/IEEE C37.2

Cod.	Descrizione
50	Relè di massima corrente ad azione istantanea. 50 N Relè di massima corrente omopolare ad azione istantanea.
51	Relè di massima corrente in c.a. ad azione ritardata. Sono compresi i relè a tempo indipendente e quelli a tempo dipendente non classificabili come 49. Questa funzione si applica ai dispositivi connessi sul secondario dei TA, per i quali si usa il suffisso G o N (51 N: relè di massima corrente ritardato in c.a. collegato al neutro del secondario di tre TA, o alimentato da uno o più riduttori toroidali in parallelo. Quando è alimentato da riduttore di corrente inserito sul collegamento a terra del centro stella del trasformatore, si usa il suffisso G - relè 51 G (*). E' escluso quanto previsto dalla funzione 64. 51 V: relè di massima corrente ritardato comandato in tensione.
67	Relè direzionale di massima corrente in c.a.
87	Relè differenziale o di protezione. 87 G: relè differenziale di generatore, 87 L: relè differenziale di linea, 87 N: relè differenziale a corrente residua, 87 T: relè differenziale di trasformatore

(*) da notare che nonostante questa definizione, è invalso l'uso del codice 51N anche per indicare soglie di protezione in relè alimentati da TA toroidali.

Sempre nell'ambito dei relè di protezione sono presenti le seguenti definizioni:

- tempo di avviamento: ovvero l'intervallo di tempo tra l'istante in cui la grandezza (o le grandezze) d'entrata è applicata, tolta, o modificata in condizioni specificate, in modo da portarlo in uno stato di funzionamento in corso, e l'istante in cui il circuito d'uscita di avviamento (Start) cambia stato;
- tempo di intervento: ovvero l'intervallo di tempo tra l'istante in cui la grandezza (o le grandezze) d'entrata è applicata, tolta, o modificata in condizioni specificate, in modo da portarlo in uno stato di funzionamento in corso, e l'istante in cui il circuito d'uscita di scatto (Trip) cambia stato;
- tempo d'inerzia: il tempo d'inerzia corrisponde alla differenza tra il tempo d'intervento del relè, per un valore specificato della grandezza di alimentazione di entrata, e la durata massima del valore della grandezza di alimentazione di entrata che, quando viene improvvisamente ridotta ad un valore specificato al di sotto del livello di funzionamento, è insufficiente a provocare l'intervento del relè stesso;

- rapporto di rilascio (o di ricaduta): il relè interviene quando la grandezza agente ha raggiunto e superato il valore prefissato di taratura e ritorna a riposo quando la grandezza agente raggiunge un valore, detto di ripristino, che dipende dalle caratteristiche costruttive del relè. Il rapporto fra il valore di ripristino e il valore di intervento è detto rapporto di ricaduta del relè;
- tempo di ricaduta (ripristino): tempo necessario al relè per ripristinarsi, in condizioni specificate dopo un intervento, in modo tale che il suo successivo tempo d'intervento non si discosti oltre una percentuale specificata dal tempo precedentemente misurato.

Queste caratteristiche per un tipico relè di protezione di linea MT di distribuzione sono le seguenti:

- tempo di avviamento: 30/70 [ms];
- tempo di intervento: 30/70 [ms];
- tempo d'inerzia: 10/50 [ms];
- rapporto di rilascio (o di ricaduta): 0.95/0.9;
- tempo di ricaduta (ripristino): 30/50 [ms].

Si riportano quindi per completezza le grandezze caratteristiche e campi di funzionamento dei relè di protezione (i valori sottolineati sono generalmente adottati dai distributori in Italia):

- grandezze caratteristiche di alimentazione d'entrata: valori preferenziali (Norma CEI 95-1)
 - di tensione 100, 110 [V] e valori moltiplicati per $\sqrt{3}$, 3 o $1/\sqrt{3}$;
 - di corrente 1 [A] (tipico per TA toroidali a corrente residua TO); 5 [A] (tipico per TA).
- grandezze di alimentazione ausiliaria: valori preferenziali (Norma CEI 95-1)
 - di tensioni alternate 100, 110, 230, 400 [V];
 - di tensioni continue 48, 110, 125, 220 [V];
 - campo di funzionamento: 80÷110 % della tensione nominale ausiliaria.
- frequenza:
 - $16_{2/3}$, 50, 60 [Hz];
 - limiti del campo nominale di frequenza: ±5%, -5%÷+10%, ±10%.
- campo nominale della temperatura ambiente: il campo nominale normalizzato deve essere scelto tra -5 ÷ +40 [°C], 0 ÷ +45[°C], -10 ÷ +55[°C], -25 ÷ +40[°C], -25 ÷ +55[°C];
- consumo nominale: il valore del consumo nominale deve essere indicato dal costruttore per ciascun circuito di alimentazione di entrata, in W per circuiti in corrente continua, in VA indicando il fattore di potenza per circuiti in corrente alternata (1 VA su ingresso 5 [A], 0.2 [VA] su ingresso 1 [A], 1 [VA] su ingresso 100 [V]);
- valore limite termico permanente per le grandezze di alimentazione di entrata: il costruttore deve dichiararne il valore (3 I_n su ingresso 5 [A], 5 I_n su ingresso 1 [A], 1,3 V_n su ingressi in tensione);
- valore limite termico di breve durata ammissibile per le grandezze di alimentazione di entrata (si applica solo a queste). Il costruttore deve dichiararne il valore per ciascuna grandezza di alimentazione di entrata del relè. I valori devono essere forniti per 1 [s], relativamente ai circuiti

di corrente, per 10 [s] relativamente ai circuiti di tensione ($100 \times I_n$ su ingresso 5 [A], $500 \times I_n$ su ingresso 1 [A], $2 V_n$ su ingressi in tensione).

- valore limite dinamico per le grandezze di alimentazione di entrata (solo ingressi in corrente): deve essere almeno 2.5 volte il valore limite termico di breve durata (valore efficace);
- durata meccanica e caratteristiche elettriche dei relè ausiliari: tipicamente il relè deve essere in grado di eseguire 10.000 operazioni senza carico sul circuito di uscita ($1.000.000$ e 100.000 al massimo potere di apertura per i relè ausiliari di segnalazione e comando). Per i relè ausiliari vanno considerate anche la corrente nominale (5 [A] per i relè di comando, 0.5 [A] per i relè di segnalazione), la corrente di breve durata (5 [s], 10 [A] per i relè di comando, 1 [A] per i relè di segnalazione) e il potere di apertura (con costante di tempo $\tau = L/R = 40$ [ms] a 110 V_{dc}, 0.5 [A] per i relè di comando, 0.2 [A] per i relè di segnalazione);
- fattori d'influenza: temperatura ambiente, pressione atmosferica, umidità relativa, campo magnetico esterno, forma d'onda delle grandezze di alimentazione.

1.2.3 Principali relè di massima corrente

Per gli scopi del presente elaborato di tesi si riportano nel seguito le principali tipologie di protezione di massima corrente oggetto di considerazione:

- protezione di massima corrente (ANSI/IEEE: 50);
- protezione di massima corrente omopolare (ANSI/IEEE: 50N);
- protezione di massima corrente ritardata (ANSI/IEEE: 51);
- protezione di massima corrente omopolare ritardata (ANSI/IEEE: 51N);
- protezione direzionale di massima corrente (ANSI/IEEE: 67);
- protezione direzionale di massima corrente omopolare (ANSI/IEEE: 67N);
- protezione di massima corrente differenziale (ANSI/IEEE: 87)

1.2.3.1 Protezioni di massima corrente - codice 50-51

Le protezioni di massima corrente (codice ANSI/IEEE: 50-51) sono normalmente utilizzate nella protezione di linee radiali, trasformatori, motori, contro i sovraccarichi ed i corto circuiti.

Sono caratterizzate da:

- tipo di funzionamento: non direzionale;
- tipo di caratteristica d'intervento:
 - a tempo indipendente: istantaneo (50) e/o ritardato (51) a due o tre soglie d'intervento;
 - a tempo dipendente: il tempo d'intervento del relè è indicato dal costruttore (non ci sono valori normalizzati) (Norma CEI 95-7).

Si riportano nel seguito i principali schemi di collegamento:

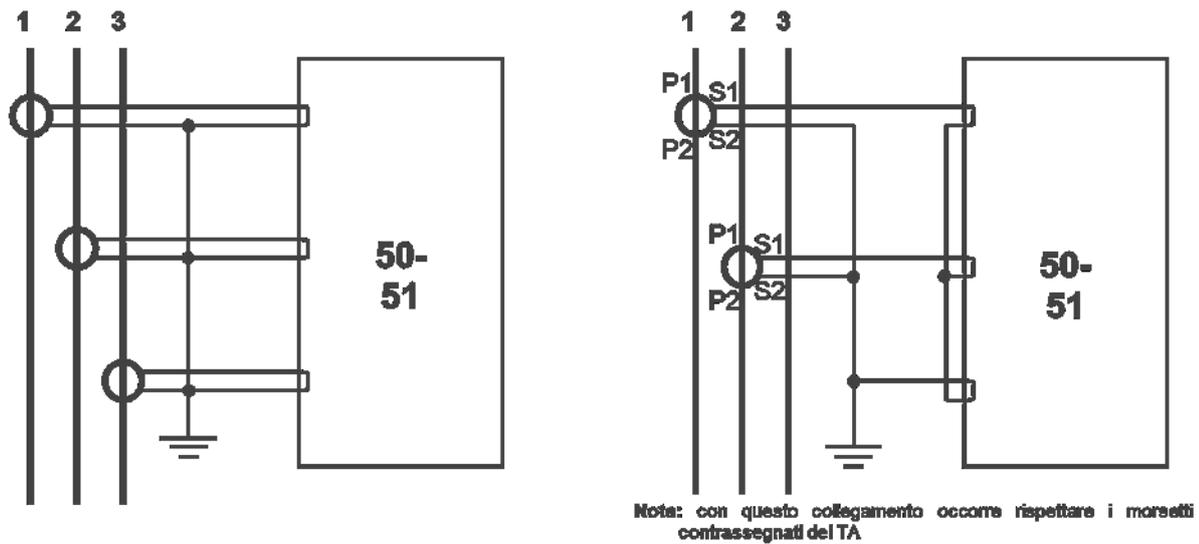


Figura 1-9 Schema di collegamento protezione di massima corrente 50/51

1.2.3.2 Protezioni di massima corrente direzionale codice 67

Le protezioni di massima corrente direzionale (codice ANSI/IEEE: 67) misurano le tre correnti di fase e le tre tensioni di rete (di fase o concatenate).

Ogni tensione viene assunta come grandezza di riferimento per la misura dell'angolo di sfasamento con la rispettiva corrente.

Si riporta nel seguito il tipico schema di collegamento:

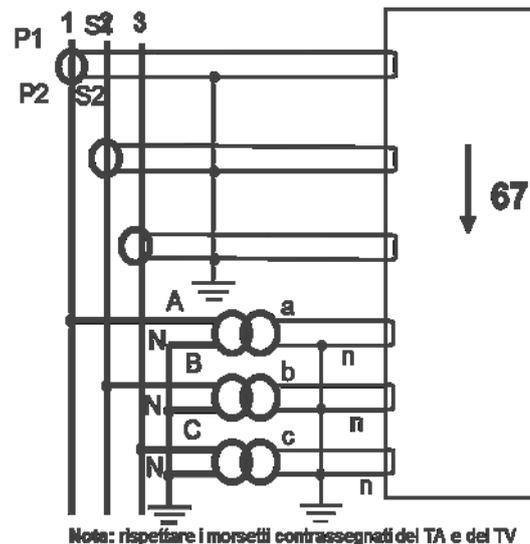


Figura 1-10 Schema di collegamento protezione di massima corrente direzionale 67

1.2.3.3 Protezioni di massima corrente omopolare codice 50N-51N

Le protezioni di massima corrente omopolare (codice ANSI/IEEE: 50-51N) vengono tipicamente utilizzate per selezionare i guasti a terra, quando il contributo della corrente omopolare a valle del punto di installazione del relè non determina interventi intempestivi per guasti a monte dello stesso. Per il principio di funzionamento e le caratteristiche d'intervento e le modalità funzionali sono le stesse dei relè di massima corrente 50-51.

Si riportano nel seguito i principali schemi di collegamento:

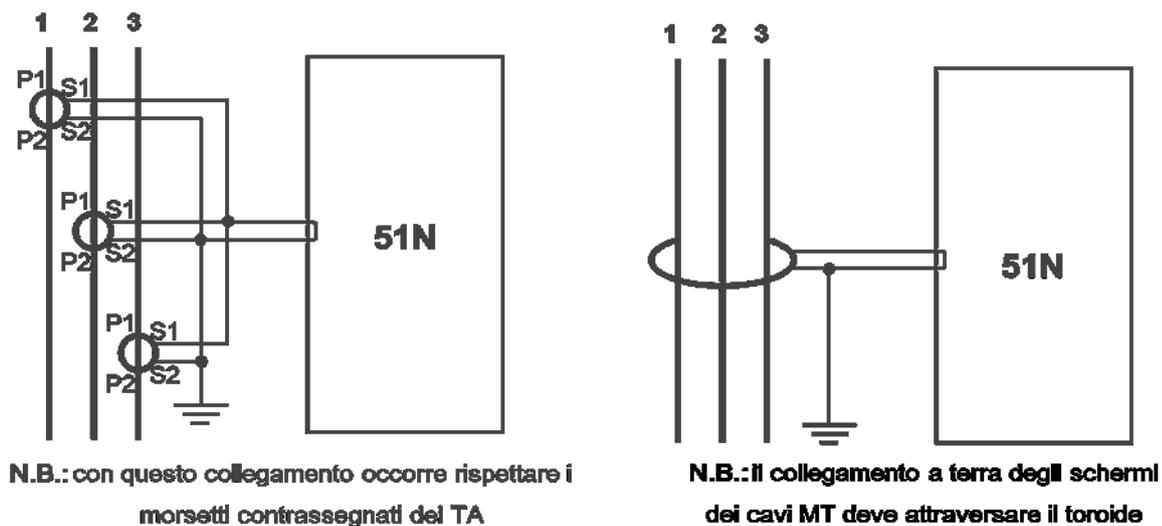


Figura 1-11 *Schema inserzione HOLMGREEN* *Schema inserzione con TA toroidale*
protezione di massima corrente omopolare 51N

Tale tipo di protezione è opportuno venga collegato a TA toroidali. Infatti il collegamento tramite TA in inserzione Holmgreen potrebbe determinare interventi intempestivi, qualora uno dei TA vada in saturazione o per effetto degli errori dei TA stessi. Questo fenomeno è particolarmente presente all'atto dell'inserzione di trasformatori, a causa della forte dissimmetria tra le tre correnti di fase.

Si evidenzia che, non essendo direzionale, questa tipologia di relè può discriminare guasti a monte od a valle del punto di installazione solo in maniera intrinseca; cioè se il contributo di corrente di guasto monofase a terra dalla rete a monte, in caso di guasto sulla rete a valle, è diverso (almeno di un ordine di grandezza) dal contributo di corrente di guasto monofase a terra dalla rete a valle, in caso di guasto sulla rete a monte.

1.2.3.4 Protezioni di massima corrente direzionale omopolare codice 67N

Le protezioni di massima corrente direzionale omopolare (codice ANSI/IEEE: 67N) sono utilizzate per rilevare solo i guasti monofase a terra con corrente avente direzione concorde alla direzionalità prestabilita per la protezione stessa.

Queste protezioni avranno la seguente logica funzionale:

- avviamento quando sono contemporaneamente soddisfatte tutte le seguenti condizioni:
 - 1) tensione residua V_E superiore alla soglia impostata;
 - 2) corrente residua I_E superiore alla soglia impostata;
 - 3) sfasamento della corrente I_E rispetto alla tensione V_E tale che il vettore I_E sia all'interno del settore angolare d'intervento impostato.
- intervento della protezione: si verifica dopo il tempo di intervento impostato se tutte le precedenti condizioni restano soddisfatte durante tale tempo.

Si evidenzia che questa tipologia di protezione (67N) permette i seguenti vantaggi rispetto alla protezione (51N):

- permette di rilevare la posizione (monte-valle) del guasto a terra;
- non rileva guasti a terra esterni all'impianto che protegge indipendentemente dal contributo alla corrente di guasto monofase a terra delle reti a monte ed a valle;
- la regolazione in corrente può essere impostata al di sotto del contributo di corrente al guasto monofase a terra dalla linea a valle (nell'ipotesi che sia quella da proteggere) in quanto si tiene conto anche della direzione del contributo e non solo del valore.

Si riporta nel seguito il tipico schema di collegamento:

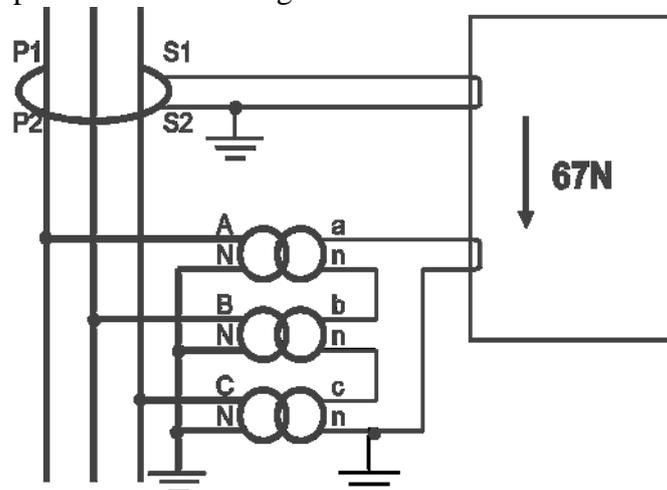


Figura 1-12 Schema di collegamento protezione di massima corrente direzionale omopolare 67N

Anche in questo caso è opportuno che la protezione venga collegata a TA toroidali. Infatti il collegamento tramite TA in inserzione Holmgreen potrebbe determinare interventi intempestivi, qualora uno dei TA vada in saturazione o per effetto degli errori dei TA stessi, come già commentato per la 51N, anche se risulta meno soggetta ad interventi intempestivi di quest'ultima, grazie al numero maggiore di condizioni che si devono soddisfare per l'intervento.

1.2.3.5 Protezioni di massima corrente differenziale codice 87

Le protezioni di massima corrente differenziale (codice ANSI/IEEE: 87) sono utilizzate per discriminare in modo selettivo i guasti interni a componenti d'impianto. Queste protezioni si basano sul bilancio delle correnti in entrata ed in uscita di una determinata zona del circuito (trasformatore, motore, generatore, sbarra, linea), detta zona protetta, delimitata tra due TA.

Alle protezioni di massima corrente differenziale sono associate le seguenti lettere, con il relativo significato funzionale:

- B: differenziale di sbarra;
- G: differenziale generatore;
- L: differenziale linea;
- M: differenziale motore;
- T: differenziale trasformatore.

Le principali caratteristiche sono: sensibilità, rapidità (scatto istantaneo) e selettività d'intervento rispetto alle altre protezioni a monte ed a valle.

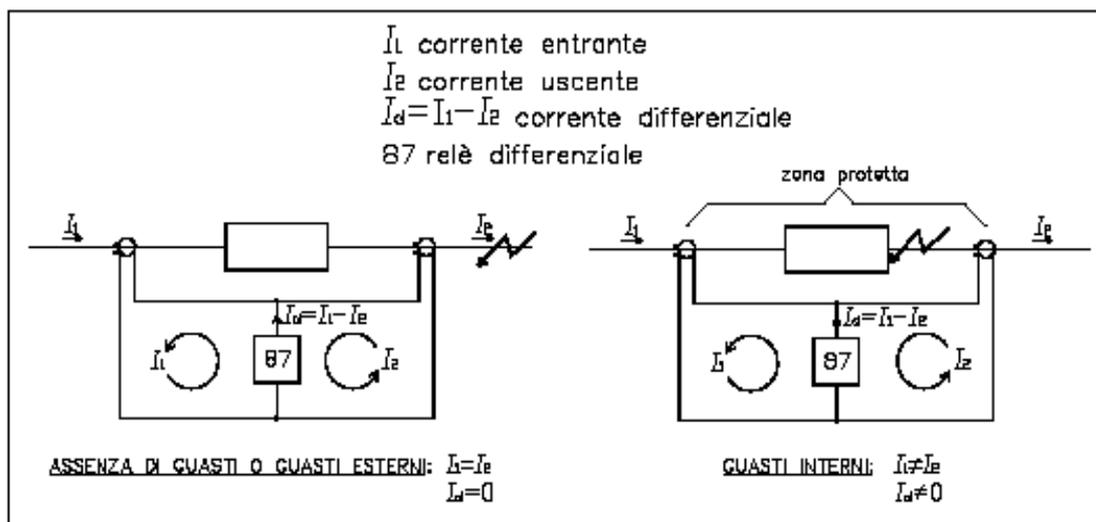


Figura 1-13 Schema di principio funzionale protezione di massima corrente differenziale 87

Questa tipologia di protezione è fortemente influenzata dalla saturazione dei TA, in presenza di cortocircuiti esterni.

1.3 Altri componenti di un sistema elettrico di protezione

Come precedentemente accennato, oltre che dai trasformatori di corrente e dal relè di protezione, un sistema di protezione di massima corrente è caratterizzato da:

- collegamenti (in a.c. e in d.c.): costituiscono l'insieme dei conduttori indispensabili per il collegamento e l'alimentazione dei diversi componenti di un sistema di protezione. Essi hanno un ruolo essenziale nel garantire la protezione e devono essere scelti con particolare cura;
- alimentazione: i dispositivi di protezione devono essere tipicamente alimentati da una fonte esterna;
- circuiti di comando e segnalazione: consentono la comunicazione e la trasmissione delle informazioni tra i diversi dispositivi del sistema di protezione. La comunicazione può avvenire tramite un apposito conduttore di segnale (tramite reti seriali RS485, reti ethernet, etc.), tramite onde radio, oppure tramite sovrapposizione del segnale ad alta frequenza alla corrente di funzionamento (power line communication - PLC).

Interruttore: è il dispositivo finale sul quale va ad agire il comando generato dal sistema di protezione. La sua apertura o chiusura comporta il cambiamento dello stato delle grandezze elettriche in uscita e l'eliminazione del guasto o delle condizioni anomale di funzionamento, o perlomeno la messa in sicurezza dell'impianto protetto.

L'interruttore deve possedere un breve tempo di commutazione, al fine di limitare la durata di permanenza del guasto. Un interruttore standard generalmente agisce in un tempo dell'ordine dei 100 [ms], mentre un interruttore ultrarapido può arrivare ad aprire in un tempo di 35 – 40 [ms].

2 - Modelli elettrici teorici e semplificati dei trasformatori amperometrici

2.1 Generalità

Per definire i successivi modelli elettrici dei TA, nella seguente figura si descrive il circuito equivalente di un trasformatore amperometrico ⁽²⁾.

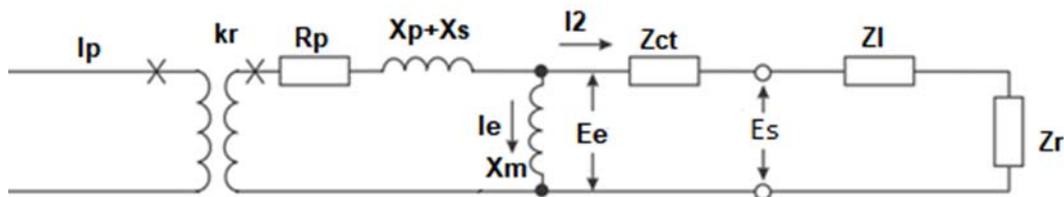


Figura 2-1 Circuito equivalente di un trasformatore amperometrico

Dove:

I_p	=	corrente del circuito primario
I_s	=	corrente del circuito secondario
I_{pr}	=	corrente del circuito primario nominale
I_{sr}	=	corrente del circuito secondario nominale
I_e	=	corrente di eccitazione
I_2	=	componente della corrente del circuito secondario verso la protezione
E_s	=	f.e.m. al secondario
E_e	=	f.e.m. di eccitazione
k_r	=	rapporto di trasformazione I_{pr}/I_{sr}
X_p	=	reattanza del circuito primario rapportata al secondario
X_s	=	reattanza del circuito secondario
X_m	=	reattanza del circuito magnetizzante (o di eccitazione)
R_p	=	resistenza del primario del TA rapportata al secondario
Z_{ct}	=	impedenza del secondario del TA
Z_l	=	impedenza dei cavi di collegamento tra TA e Relè di protezione
Z_r	=	impedenza del carico costituito dal Relè di protezione

Nel circuito rappresentato si è trascurata la resistenza del ramo derivato R_a in quanto di valore tipicamente trascurabile rispetto alla X_m .

Per prima cosa si evidenzia che, tipicamente, le reattanze di dispersione (X_p) e (X_s) sono trascurabili, soprattutto nel caso di TA con avvolgimenti uniformemente distribuiti e circuito magnetico chiuso (assenza di traferro come nel caso di TA di classe P e C).

Si evidenzia inoltre che non tutti i TA di protezione hanno avvolgimenti uniformemente distribuiti. Tuttavia i classici TA a primario passante (bushing) di classe P, PX (IEC) o C (IEEE), in genere, hanno avvolgimenti secondari completamente distribuiti, quando viene utilizzato il rapporto di trasformazione completo. Peraltro, per TA a primario passante risulta sempre trascurabile la resistenza R_p . Le impedenze del circuito secondario del TA (Z_{ct}) sono inoltre tipicamente resistive, a causa della ridotta sezione dei conduttori utilizzati nei TA stessi. Pertanto nei modelli che seguiranno sarà considerata la sola resistenza del secondario del TA (R_{ct}).

Inoltre, nei moderni relè digitali il carico degli stessi relè (Z_r) risulta tipicamente di valore ridotto e comunque resistivo.

Quindi la seguente figura ripropone il circuito equivalente di Figura 2-1 del TA, con le assunzioni appena riportate (con $R_b = R_l + R_r$ e $X_b = X_l$).

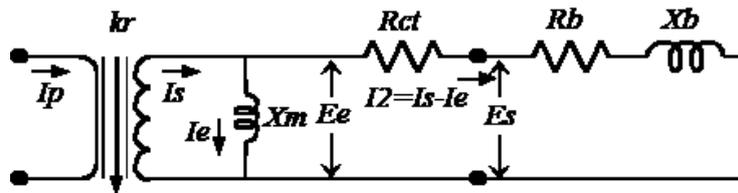


Figura 2-2 Circuito base di un trasformatore amperometrico

La reattanza di magnetizzazione X_m , nella zona lineare della curva di eccitazione, può considerarsi tipicamente con valori compresi tra 100-10.000 [Ω], mentre nella zona di saturazione della curva di eccitazione, la reattanza X_m assume valori molto piccoli (⁵).

2.2 Generalità sul fenomeno della saturazione

Il fenomeno della saturazione del TA avviene tipicamente quando la f.e.m. sull'avvolgimento secondario E_e supera la tensione di ginocchio E_k , sviluppata dal nucleo del TA, a causa dell'eccessivo carico al secondario del TA nelle condizioni di sovracorrente.

Nelle condizioni iniziali di saturazione la corrente di eccitazione I_e del TA può comportare, nella misura della I_2 , un errore composto ε_c pari o superiore al limite imposto per la classe del TA stesso, mentre in condizioni di saturazione profonda il ramo di magnetizzazione del nucleo del TA assume un'impedenza trascurabile e pertanto la tensione sull'avvolgimento secondario E_e si annulla, così come la corrente I_2 rilevata dalla protezione.

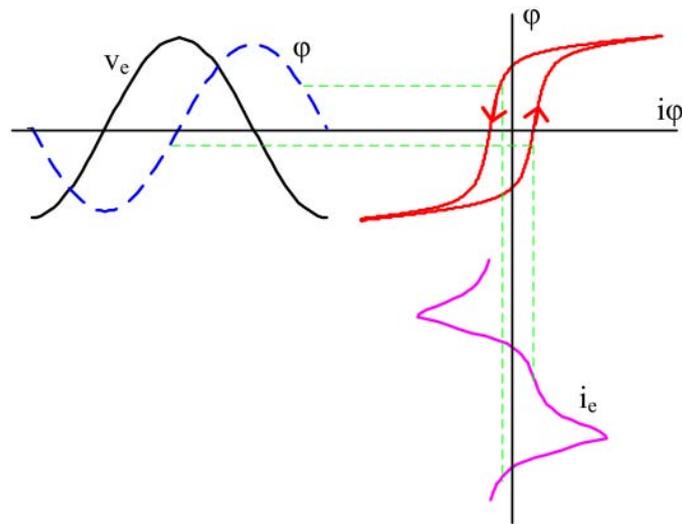


Figura 2-3 Relazione tra flusso di eccitazione (φ) e corrente magnetizzante (i_e)

La condizione di saturazione viene inoltre accentuata dall'eventuale presenza di una componente continua di corrente, presente nelle fasi iniziali di cortocircuito. Tale situazione viene tipicamente a verificarsi in presenza di grossi trasformatori, generatori ovvero quando il rapporto X/R di sistema assume valori significativi.

Di conseguenza, la saturazione causata dalla componente continua della corrente di guasto primaria influenza anch'essa la tensione sull'avvolgimento secondario E_e e la forma d'onda della corrente I_2 rilevata dalla protezione.

Si ricorda che, nel caso di cortocircuiti di tipo polifase, il valore della componente unidirezionale (i_{uni}) è legato a quello della corrente simmetrica (i_{sim}) di cortocircuito, secondo le relazioni:

$$i_{sim} = \sqrt{2}I_k \text{sen}(\omega t - \varphi_k) \quad (2.1)$$

$$i_{uni} = \sqrt{2}I_k \text{sen}\varphi_k e^{-\frac{t}{T_p}} \quad (2.2)$$

dove:

- φ_k è lo sfasamento della componente simmetrica di guasto, ovvero $\tan^{-1}(X/R)$
- T_p è la costante di tempo del sistema (L/R)

La costante di tempo $T_p = L/R$ della componente unidirezionale (con "R" si intende la resistenza e con "L" l'induttanza del circuito a monte del punto di guasto) dipende dalla rete e può risultare dell'ordine dei 100÷150 [ms] per reti AT e dell'ordine dei 20÷30 [ms] per reti MT.

2.2.1 Tensione al ginocchio e di saturazione

Secondo la normativa IEC 61869-2 il ginocchio della curva di magnetizzazione è il punto in cui, ad un incremento del 10% della f.e.m. dell'avvolgimento secondario (valore efficace) corrisponde un aumento del 50% della corrente di eccitazione I_e (²).

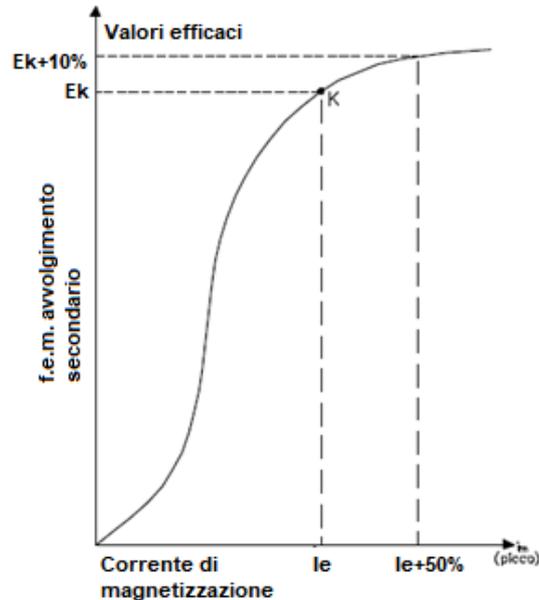


Figura 2-4 Tipico diagramma f.e.m. / corrente di eccitazione di un TA

Superato il ginocchio, il TA presenta, in rapporto al grado di saturazione:

- come già detto, un'impedenza di magnetizzazione con valori sempre più piccoli;
- una f.e.m. E_e con valori sempre più piccoli;
- una corrente magnetizzante I_e con valori sempre più elevati.

Altresì, nello standard IEEE C37.110 la tensione di ginocchio, per TA senza traferro, è definita come il punto nella curva di eccitazione tangente ad una retta a 45° (nel caso di TA con traferro 30°). Il punto di ginocchio non è quindi il punto di saturazione. Infatti, secondo lo stesso standard IEEE C37.110, la tensione di saturazione è individuata dall'intersezione delle due rette, tracciate nel piano cartesiano con base logaritmica, rispettivamente tangenti alla curva di eccitazione in zona di linearità ed alla curva di eccitazione nella zona di completa saturazione.

Si riporta nel seguito un tipico diagramma che illustra le suddette modalità di individuazione della tensione di saturazione e di ginocchio secondo la IEEE C37.110.

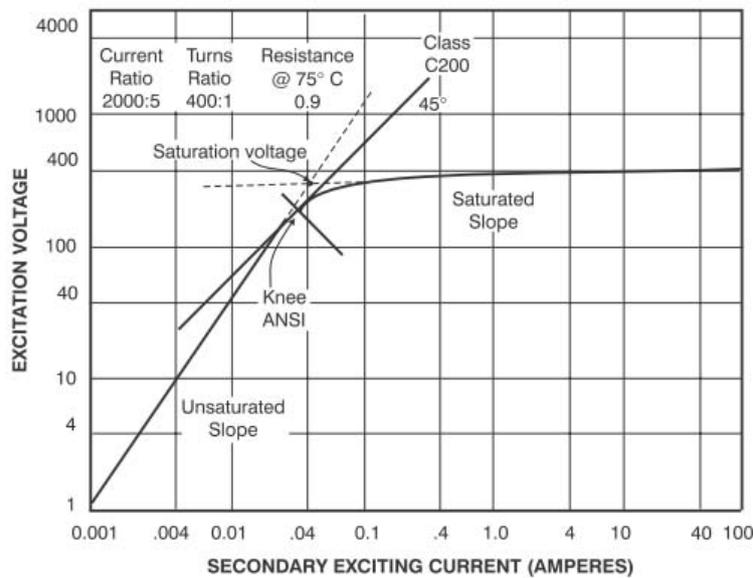


Figura 2-5 Individuazione tensione di saturazione e tensione di ginocchio su tipico diagramma f.e.m. / corrente di eccitazione di un TA

Inoltre, secondo lo standard IEEE C37.110 la tensione limite di saturazione E_{sat} può essere praticamente definita come il valore efficace della tensione di eccitazione, corrispondente alla corrente di eccitazione I_e tale da rispettare dell'errore ϵ_c , quindi:

$$I_e = \frac{I_{sr} \cdot \epsilon_c \cdot ALF}{100} \tag{2.3}$$

Per esempio:

- nel caso di TA, con corrente nominale secondaria di $I_{sr}=1[A]$, con $\epsilon_c= 10\%$, $VA_r=20 [VA]$ ed ALF di 20, $I_e=1 \times 10 \times 20 / 100 = 2 [A]$;
- nel caso di TA, con corrente nominale secondaria di $I_{sr}=5[A]$, con $\epsilon_c= 10\%$ $VA_r=20 [VA]$ ed ALF di 20, $I_e=5 \times 10 \times 20 / 100 = 10 [A]$.

In mancanza della curva di eccitazione specifica del TA si assume $E_{sat} = (VA_r / I_{sr}) * ALF$, che per i suddetti due casi risulta:

- nel caso di TA, con $I_{sr}=1[A]$ $E_{sat} = (20/1) \times 20 = 200 [V]$;
- nel caso di TA, con $I_{sr}=5[A]$ $E_{sat} = (20/5) \times 20 = 80 [V]$.

La stessa norma IEEE C37.110 sottolinea che, per avere migliore accuratezza, E_{sat} dovrebbe essere un valore fornito dal costruttore.

Per esempio, nel caso di TA con $VA_r=50[VA]$, $I_{sr}=1[A]$, ALF=20 la tensione $E_{sat} = 1.000 [V]$, ma la misura effettiva del costruttore potrebbe essere più elevata (es. 1150 [Vrms]).

2.3 Considerazioni sul circuito semplificato

Riprendendo il circuito semplificato di Figura 2-2 si assume che l'impedenza (o meglio la reattanza X_m) del ramo di eccitazione risulti in sostanza trascurabile, durante la saturazione del TA e questo influisce pesantemente sulle prestazioni dell'apparato di protezione (relè) ⁽²⁾.

Quindi, quando tutto il nucleo è magnetizzato al valore massimo ed il flusso di corrente primario è orientato verso una magnetizzazione più profonda, il valore della reattanza X_m diventa trascurabile. Tuttavia, la magnetizzazione è un fenomeno non lineare; pertanto diversi valori di reattanza X_m dovrebbero essere individuati, con apposite misure, per ogni livello di eccitazione.

Semplificando l'analisi, si riportano nella figura seguente n.3 diagrammi flusso (ϕ) / corrente di magnetizzazione (i_e), che rappresentano in modo elementare le modalità funzionali dei TA con livelli di eccitazione bassa, media ed alta ⁽¹⁾.

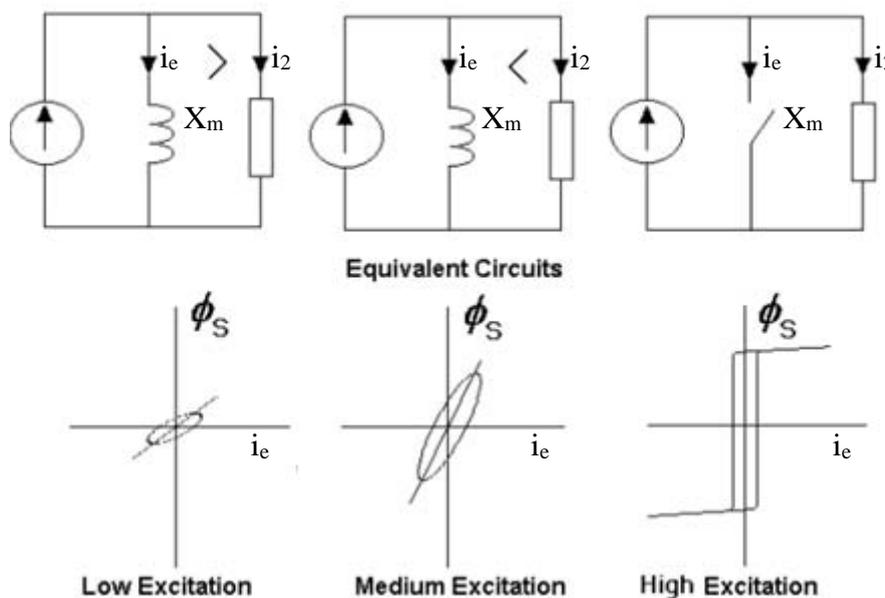


Figura 2-6 Circuiti esemplificati e diagrammi funzionali TA con eccitazione bassa, media ed alta

Con riferimento alla figura, a bassi livelli di eccitazione, la derivata $d\phi/di_e$, che rappresenta l'induttanza di magnetizzazione (nel seguito rappresentata con la reattanza X_m) risulta di valore ridotto; questo a causa di un valore relativamente elevato della corrente di magnetizzante i_e , rispetto alla corrente di carico i_2 .

Nel medio regime di eccitazione, la derivata $d\phi/di_e$ è di valore relativamente elevato, quindi la reattanza X_m di magnetizzazione risulta di valore più elevato e la corrente di magnetizzazione i_e risulta relativamente piccola, rispetto alla corrente del carico i_2 .

Nel funzionamento ad alta eccitazione, la caratteristica curva ϕ/i_e , presenta la massima pendenza nella zona di transizione a stati saturi e una bassa pendenza nelle zone di saturazione. Quindi, la

reattanza X_m di magnetizzazione risulta di valore molto elevato nella zona di transizione e di valore molto ridotto nella zona di saturazione.

In pratica, il fatto che la corrente di magnetizzazione risulti così piccola durante la transizione, rispetto alla corrente in fase di saturazione, suggerisce che questa possa essere ignorata.

Semplificando, il ramo di eccitazione può essere visto semplicemente come un interruttore, come mostrato nel terzo schema della Figura 2-6, che risulta aperto nelle fasi di rapida variazione del flusso ed altresì chiuso durante le fasi di saturazione.

Si evidenzia che il punto del ginocchio ANSI della caratteristica di eccitazione corrisponde approssimativamente alla massima impedenza magnetizzante X_m . Infatti, sopra il punto di ginocchio, piccoli aumenti della tensione di eccitazione E_e causano grandi aumenti di I_e , che corrispondono a una reattanza magnetizzante (X_m) più bassa.

2.4 Modello semplificato della caratteristica di eccitazione del TA

Considerando quanto precedentemente esposto, qualora la corrente di eccitazione entri nella regione di saturazione, il PSRC IEEE (Power System Relaying Committee) ha proposto un modello semplificato del comportamento dei TA di protezione, basato sull'assunzione di una curva semplificata di saturazione, individuata nella seguente figura, dove la porzione della curva al di sotto del punto di ginocchio viene ignorata, in considerazione dei poco sensibili effetti sulla soluzione del problema, ovvero in considerazione del ridotto errore relativo nella valutazione delle performance del TA di protezione stesso ⁽⁶⁾.

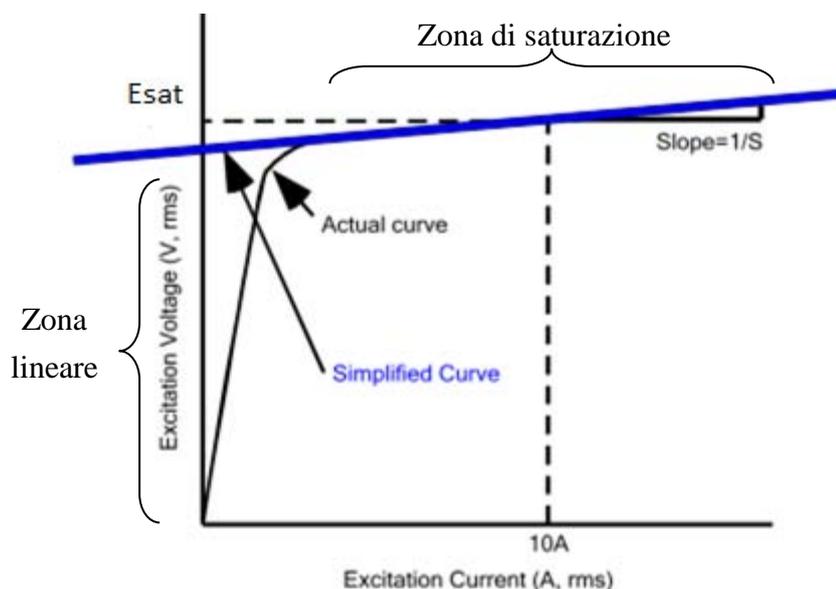


Figura 2-7 Modello semplificato della caratteristica di eccitazione del TA proposto dal PSRC

In sintesi, con questa assunzione, il comportamento del TA di protezione in zona di saturazione può essere modellato individuando nella caratteristica di eccitazione (senza fenomeni d'isteresi) la retta

con pendenza $1/S$ passante per il punto E_{sat} (tensione limite oltre alla quale l'errore composto risulta maggiore del limite imposto), con corrente di eccitazione I_e .

Per questo modello sarà quindi sufficiente la determinazione del reciproco della pendenza della parte superiore della curva di magnetizzazione (zona di saturazione), denominato S e del valore di E_{sat} , nella caratteristica di eccitazione del TA.

Tipicamente, per TA di MT, il valore di S è compreso tra 15 e 25.

2.5 Modello di calcolo semplificato

Esistono molti documenti tecnici in materia di modellizzazione del comportamento dei trasformatori di corrente di protezione con nucleo in ferro.

Una delle difficoltà nell'uso di un modello elaborato (in qualsiasi campo dell'ingegneria) è quella di ottenere i parametri in un caso particolare, al fine di implementare quel modello in modo facile, efficiente e preciso.

Ad esempio, la corrente di eccitazione nella regione sotto la punta del ginocchio è una complessa combinazione di componenti magnetizzante, di isteresi, correnti parassite, i cui parametri di solito non sono noti in un caso particolare.

Come già visto nel capitolo precedente, considerando che, se la corrente di eccitazione raggiunge la regione satura, la parte della curva di eccitazione nella regione del punto sotto il ginocchio ha un effetto trascurabile sulla soluzione globale, questa assunzione permette di semplificare notevolmente il calcolo, con ridotti effetti sulla precisione.

Ovviamente, qualora gli errori in condizioni di bassa corrente e basso carico siano non trascurabili sarà necessario utilizzare un modello di calcolo più elaborato e preciso.

Quindi, rispetto a quanto sopra definito, nel seguito verrà illustrato un metodo di calcolo semplificato, proposto da IEEE PSRC ⁽⁶⁾, che consente la predisposizione di uno specifico algoritmo di calcolo delle fasi di saturazione di un TA, in grado di dare un'indicazione sufficientemente accurata della forma d'onda effettiva della corrente secondaria I_2 acquisita dalla protezione.

2.5.1 Dettagli sul modello di calcolo

La caratteristica di eccitazione del TA è genericamente espressa da un diagramma, in base logaritmica, dei valori misurati della tensione secondaria rispetto alla corrente secondaria di eccitazione (rilevata ad esempio con le procedure previste al punto 2B.2.2 della norma CEI/EN 61869-2), come mostrato nella seguente figura.

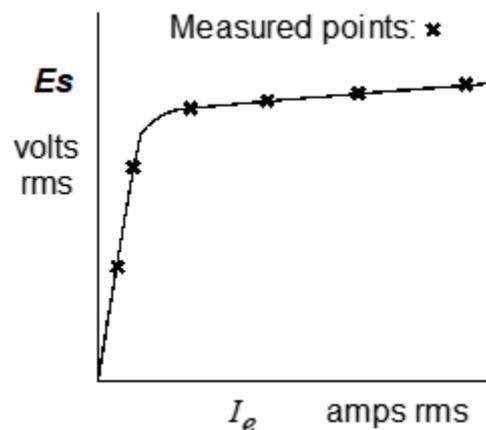
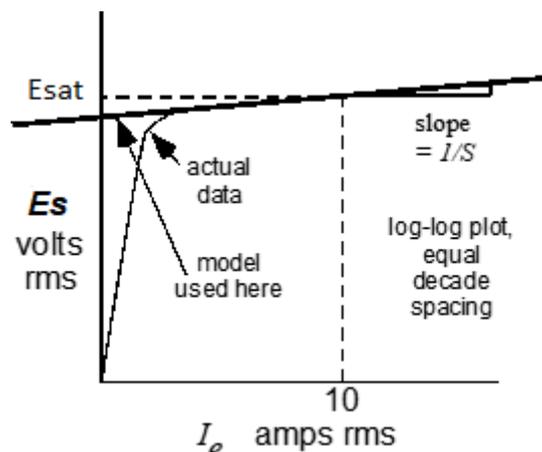


Figura 2-8 Misura della caratteristica di eccitazione

Il diagramma è tipicamente derivato da dati di misura forniti dal costruttore del TA o rilevati in laboratorio.

Per il metodo di valutazione semplificato IEEE PSRC ⁽⁶⁾, descritto al precedente § 2.4, dalla suddetta curva devono essere estratti i parametri S ed E_{sat} , come indicato nella seguente figura (nel caso di $I_e = 10$ [A]):


 Figura 2-9 Determinazione dei parametri S ed E_{sat}

In particolare, come già detto, S rappresenta l'inverso della pendenza della caratteristica di eccitazione nella zona di saturazione ed E_{sat} rappresenta la tensione limite di saturazione, alla corrente di eccitazione limite di classe (nel caso di TA con corrente secondaria nominale 5 [A] e ALF 20, con ε_c del 10%, la corrente di eccitazione limite di classe vale 10 [A]).

La linea retta con pendenza $1/S$, riportata nel grafico con base logaritmica nella precedente Figura 2-9, è definita dalla seguente espressione:

$$\log E_e = \frac{1}{S} \log I_e + \log E_i \quad (2.4)$$

dove $E_i = E_e$, con $I_e = 1$ [A] e quindi con $\log I_e = 0$.

Rimuovendo i logaritmi dall'espressione (2.4), questa diventa:

$$E_e = E_i I_e^{1/S} \quad (2.5)$$

Quindi, ricordando il circuito semplificato, già descritto in precedenza in Figura 2-2, considerando i valori istantanei delle correnti e delle tensioni;

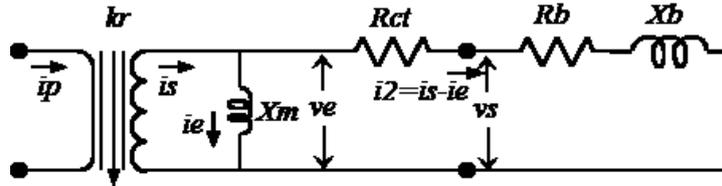


Figura 2-10 Circuito base di un trasformatore amperometrico

applicando la Legge di Kirchhoff alla maglia di destra, si ottiene la seguente equazione differenziale con riferimento ai valori istantanei di corrente e tensione:

$$v_e - (i_s - i_e) \cdot R_t - L_b \frac{d[i_s - i_e]}{dt} = 0 \quad (2.6)$$

con $R_t = R_{ct} + R_b$.

Per la risoluzione di questa equazione differenziale sarà quindi necessario relazionare i valori istantanei di v_e ed i_e . Innanzitutto si consideri il flusso di magnetizzazione λ correlato al valore istantaneo di v_s (considerando la Legge di Faraday), secondo l'espressione:

$$v_s = \frac{d\lambda}{dt} + R_{ct} i_2 \quad (2.7)$$

Si consideri quindi che il termine $R_{ct} i_2$ risulta molto piccolo rispetto all'errore nella misura della curva reale di eccitazione ($E_s - I_e$). Pertanto semplificando la (2.7) si ottiene:

$$v_s = v_e = \frac{d\lambda}{dt} \quad (2.8)$$

Si assuma poi la seguente funzione, che definisce il legame del flusso di magnetizzazione λ con la corrente di eccitazione i_e :

$$i_e = A\lambda^S \quad (2.9)$$

Si noti che la funzione risulta corretta considerando valori di S interi e dispari. Quindi, al fine di poter considerare qualsiasi S positivo, mantenendo la funzione dispari, si adotterà la seguente funzione:

$$i_e = A \operatorname{sign}(\lambda) |\lambda|^S \quad (2.10)$$

Questa funzione porta al seguente diagramma flusso / corrente di eccitazione ($\lambda - i_e$):

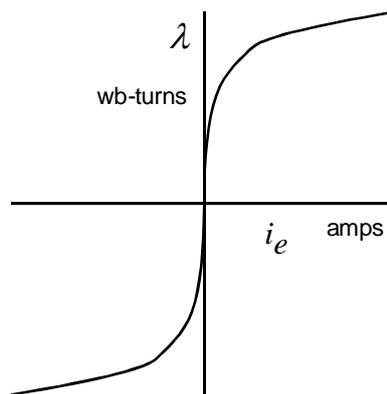


Figura 2-11 - Grafico dei valori istantanei $\lambda - i_e$, della curva di saturazione (in assenza di isteresi)

A questo punto si procede con il determinare la variabile A, parametrizzata da $\lambda - i_e$.

Si consideri che, la curva di eccitazione viene misurata utilizzando una tensione sinusoidale, che implicherebbe la presenza di un flusso concatenato anch'esso con forma d'onda sinusoidale:

$$v_e = \sqrt{2} E_e \cos(\omega t) \quad (2.11)$$

$$\lambda = \int v_e dt = \int \sqrt{2} E_e \cos(\omega t) dt = \sqrt{2} E_e \frac{1}{\omega} \operatorname{sen}(\omega t) \quad (2.12)$$

Tuttavia, la corrente di eccitazione non è certamente sinusoidale in quanto, come sopra definito, funzione di ordine S del flusso λ .

$$i_e = A \lambda^S = A \left[\frac{\sqrt{2} E_e}{\omega} \operatorname{sen}(\omega t) \right]^S = A \left[\frac{\sqrt{2} E_e}{\omega} \right]^S \operatorname{sen}^S(\omega t) \quad (2.13)$$

Il valore efficace della corrente di eccitazione è pertanto definito dalla seguente:

$$I_e = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i_e^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} A^2 \left[\frac{\sqrt{2} E_e}{\omega} \right]^{2S} \operatorname{sen}^{2S}(\omega t) dt}$$

$$I_e = A \left[\frac{\sqrt{2}E_e}{\omega} \right]^S \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \text{sen}^{2S}(\omega t) dt} \quad (2.14)$$

Nel seguito si definisce RP come il rapporto tra il valore efficace (RMS) ed il valore di picco (PK) della corrente di eccitazione:

$$RP = \frac{I_{RMS}}{I_{pk}} \quad (2.15)$$

Nel caso di forma d'onda sinusoidale RP sarà ovviamente pari a 0.7071 mentre per una particolare corrente i_e , RP sarà determinato dalla seguente funzione:

$$RP = \frac{\sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} I_{pk}^2 \text{sen}^{2S}(\omega t) dt}}{I_{pk}} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \text{sen}^{2S}(\omega t) dt} \quad (2.16)$$

La seguente figura illustra la differenza tra valore efficace (RMS) e valore di picco (PK) per una forma d'onda sinusoidale e lo stesso confronto per una forma d'onda della corrente di eccitazione presunta.

Si evidenzia inoltre il che fattore di forma RP si riduce all'aumentare del valore di S .

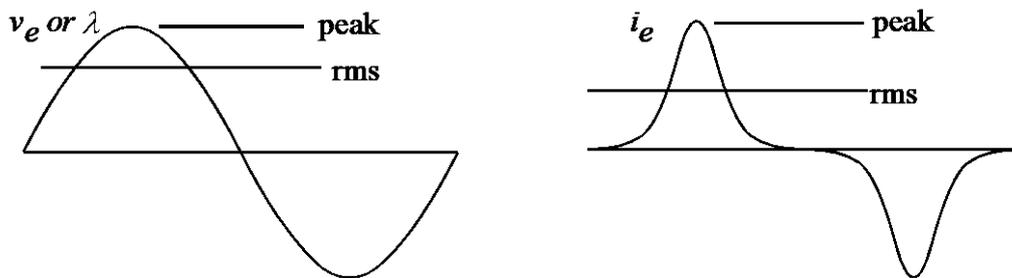


Figura 2-12: confronto del rapporto RMS / PK per due forme d'onda (sinistra: tensione di eccitazione sinusoidale, destra: corrente di eccitazione).

La suddetta funzione integrale può essere risolta con metodi numerici di integrazione. Nel seguito si prevede quindi l'utilizzo del metodo di integrazione dei "trapezi".

Sostituendo RP nell'equazione (2.14) si ottiene:

$$I_e = A \left[\frac{\sqrt{2}E_e}{\omega} \right]^S \cdot RP \quad (2.17)$$

ricordando che con $I_e = I_{sr} \cdot ALF \cdot \varepsilon_c$, $E_e \approx E_{sat}$
(esempio: $I_e = 10$ A, con $I_{sr} = 5$ A, $ALF = 20$, $\varepsilon_c = 10$ %).

$$I_{sr} \cdot ALF \cdot \varepsilon_c = A \left[\frac{\sqrt{2} E_{sat}}{\omega} \right]^S \cdot RP \quad (2.18)$$

risolvendo quindi per A:

$$A = \frac{I_{sr} \cdot ALF \cdot \varepsilon_c \cdot \omega^S}{(\sqrt{2} E_{sat})^S \cdot RP} \quad (2.19)$$

Pertanto l'equazione (2.10) diviene:

$$i_e = \text{sign}(\lambda) \frac{I_{sr} \cdot ALF \cdot \varepsilon_c \cdot \omega^S}{(\sqrt{2} E_{sat})^S \cdot RP} |\lambda|^S \quad (2.20)$$

che risulta la funzione fondamentale del rapporto tra flusso λ e corrente di eccitazione i_e .
Considerando ora che:

$$\frac{di_e}{dt} = \frac{di_e}{d\lambda} \cdot \frac{d\lambda}{dt} \quad (2.21)$$

e che dalla (2.9):

$$\frac{di_e}{d\lambda} = A \cdot S \cdot |\lambda|^{S-1} \quad (2.22)$$

sostituendo nella (2.6), considerando la (2.8), si ottiene:

$$\frac{d\lambda}{dt} \cdot [1 + L_b \cdot A \cdot S \cdot |\lambda|^{S-1}] = -R_t i_e + R_t i_s + L_b \frac{di_s}{dt} \quad (2.23)$$

ovvero:

$$\frac{d\lambda}{dt} = \frac{-R_t i_e + R_t i_s + L_b \frac{di_s}{dt}}{[1 + L_b \cdot A \cdot S \cdot |\lambda|^{S-1}]} \quad (2.24)$$

La precedente equazione differenziale non lineare del primo ordine è risolvibile per $\lambda(t)$ utilizzando tecniche di analisi numerica standard, come l'integrazione trapezoidale, l'integrazione di Runge-Kutta o semplici incrementi di gradino. Quest'ultimo metodo sarà utilizzato nel codice di calcolo considerandone l'accuratezza sufficiente per l'applicazione in oggetto.

Si consideri inoltre che la “funzione forzante” della corrente di guasto al secondario (i_s), con riferimento alle (2.1)(2.2), e la relativa derivata saranno:

$$i_s = \frac{i_p}{k_r} = \frac{\sqrt{2}I_p}{k_r} \left[\text{sen}(\varphi_k) \cdot e^{-\frac{t}{T_p}} + \text{sen}(\omega t - \varphi_k) \right] \quad (2.25)$$

$$\frac{di_s}{dt} = \frac{\sqrt{2}I_p}{N} \left[\frac{-\text{sen}(\varphi_k)}{T_p} \cdot e^{-\frac{t}{T_p}} + \omega \cdot \text{cos}(\omega t - \varphi_k) \right] \quad (2.26)$$

dove, come già detto:

- φ_k lo sfasamento della componente simmetrica di guasto, ovvero $\tan^{-1}(X/R)$;
- T_p è la costante di tempo del sistema (L/R).

Quindi la corrente di eccitazione i_e è data dalla soluzione dall'equazione (2.20) e la corrente secondaria verso la protezione (i_2) sarà calcolata come:

$$i_2 = i_s - i_e \quad (2.27)$$

2.5.1.1 Valutazione del flusso residuo

Per completare l'analisi del comportamento in saturazione del TA è possibile considerare la presenza di una magnetizzazione residua, plausibile ad esempio in caso di richiusura su guasto.

La curva di saturazione semplificata, assunta nella precedente trattazione, non consente, in linea di principio, la valutazione del flusso residuo poiché non sono possibili valori di λ diversi da zero con corrente di eccitazione i_e pari a 0.

Tuttavia, la presenza di un flusso residuo può essere considerata supponendo che la corrente di eccitazione iniziale sia diversa da zero.

Una corrente di eccitazione i_e iniziale piuttosto piccola può infatti denotare la presenza di un consistente flusso residuo.

Quindi, per opportunità, nel modello di calcolo il flusso residuo (λ_{rem}) sarà espresso in p.u., in rapporto a E_{sat} (ovvero come rapporto x/y nel grafico seguente). Tuttavia, si evidenzia che in questo modo la valutazione della magnetizzazione residua risulta poco accurata (seppur adeguata ad un primo approccio) in quanto non considera fenomeni di isteresi.

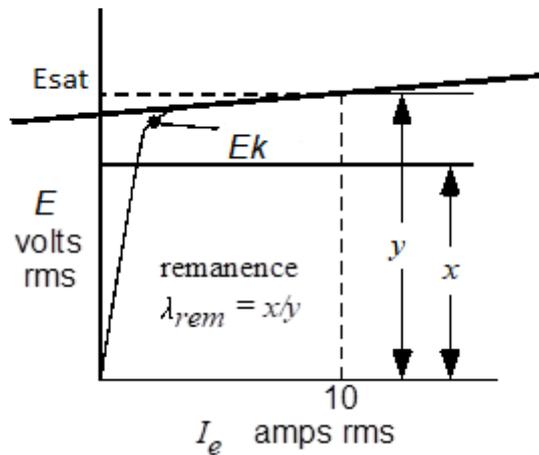


Figura 2-13 Modalità di definizione del λ_{rem}

Si evidenzia inoltre che la tensione di ginocchio E_k (con riferimento alla guida IEEE C37.110) è tipicamente pari all'80% di E_{sat} , pertanto la massima magnetizzazione residua non dovrebbe essere superiore a 0.8 (p.u.).

In questo modello la polarità della magnetizzazione residua sarà inoltre cautelativamente considerata positiva e potrà pertanto portare ad una saturazione prematura del TA.

2.5.2 Modello relè digitale di massima corrente

Per completare il modello di calcolo semplificato è prevista una modellizzazione sintetica del comportamento del relè digitale di massima corrente (3).

Pertanto, nel seguito si descrivono le principali caratteristiche utili all'implementazione di questo modello di calcolo. Nella seguente figura è schematizzato il diagramma funzionale di un relè di massima corrente a microprocessore.

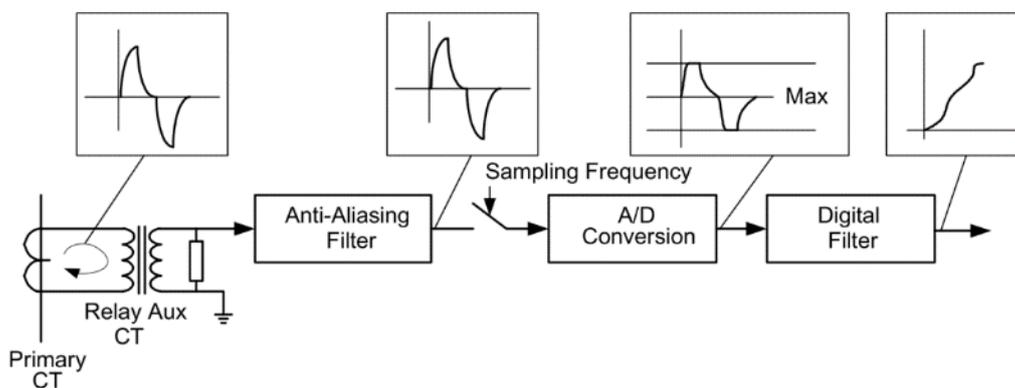


Figura 2-14 Diagramma funzionale di un relè di massima corrente

In particolare questo schema illustra come il segnale analogico rilevato dalla protezione viene convertito in forma digitale.

Nella stessa figura sono individuabili:

- un dispositivo che converte la corrente secondaria del TA in un segnale di tensione;

- un filtro LPF (Low Pass Filter) anti-aliasing che rimuove le alte frequenze presenti nella forma d'onda del segnale in tensione;
- un convertitore A/D, che converte il segnale in tensione in valore digitale, con una frequenza di campionamento tipica di 16-64 campioni per ciclo. Il convertitore opera su segnali ad ampiezza limitata, pertanto segnali over-range (saturazione del convertitore A/D) verranno limitati alla massima ampiezza consentita dal convertitore;
- un filtro digitale (DFT), con funzione di “cosine-filter”, per la rimozione della componente d.c. e di tutte le armoniche, al fine della determinazione del valore della componente fondamentale del segnale. Il filtro opera sul campionamento “sliding windows” della forma d'onda convertita.

Inoltre, è possibile che alcuni relè di protezione siano dotati di funzionalità avanzate con filtri RMS (Root Mean Square) di tutte le componenti e Picco-Picco (Pk-Pk). In particolare, questi filtri RMS prendono in considerazione il contenuto totale di energia, comprese componenti d.c. ed ogni frequenza presente nella forma d'onda campionata. Anche i filtri digitali di Picco-Picco rispondono sia alle componenti armoniche che alla componente d.c.. Si evidenzia che in alcuni relè di protezione, anche di tipologia avanzata, quest'ultima funzione di rilevazione non risulti presente, tuttavia nel seguito, per completezza, ne sarà illustrata la funzionalità. La seguente figura illustra un esempio di rilevatore Picco-Picco che calcola il valore di picco della forma d'onda come la media del valore assoluto di due picchi positivi e negativi consecutivi.

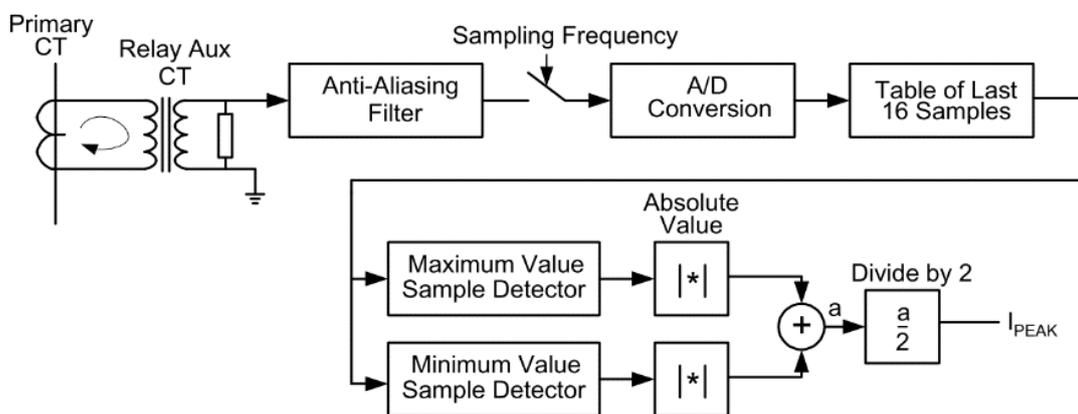


Figura 2-15 Diagramma funzionale rilevatore Picco – Picco bipolare

Prestazioni dei filtri digitali con TA in saturazione

I filtri digitali non possono effettuare una misurazione accurata della corrente di guasto qualora il TA lavori in saturazione. Si sottolinea infatti che l'entità della fondamentale in una forma d'onda di corrente fortemente saturata può essere tale da non riprodurre correttamente la corrente di guasto effettiva. Tuttavia, la risposta più efficace dei filtri RMS e di Picco-Picco a rapidi aumenti della corrente misurata può consentire una più efficace riproduzione della grandezza effettiva rispetto a quanto possibile con il solo filtro di componente fondamentale (Cosine Filter).

Per evidenziare ciò, sono confrontate nell'esempio di seguito proposto le risposte dei filtri componente fondamentale, RMS e di picco-picco, nel caso di TA in forte saturazione.

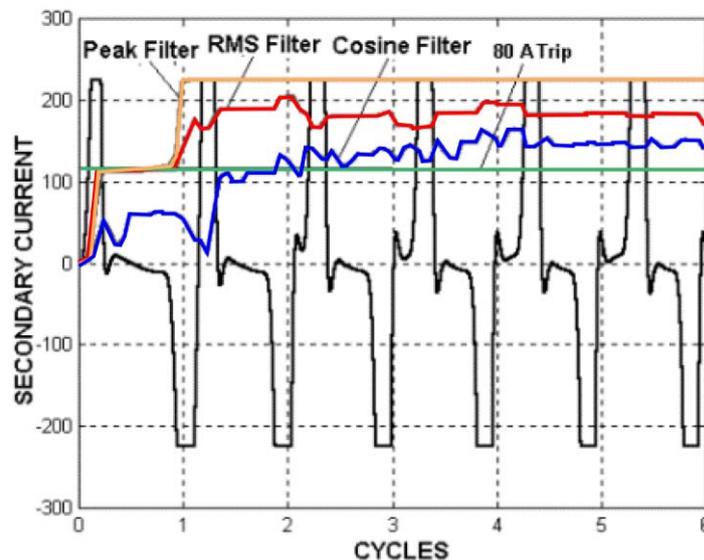


Figura 2-16 Esempio risposte dei filtri di Picco, RMS e componente fondamentale

Nella precedente figura, il filtro RMS ha tipicamente un segnale in rapido aumento, rispetto al filtro di componente fondamentale; lo stesso dicasi per il filtro Picco-Picco. Tuttavia, lo stesso filtro RMS potrebbe presentare una risposta con sovraelongazioni eccessive, in fase transitoria, poiché deve rispondere anche all'offset della componente d.c. (³). Questo comportamento potrebbe non risultare compatibile con le modalità funzionali della protezione di massima corrente. Questo è evidenziato nella seguente figura dove, nel caso di TA non saturo, è confrontato il comportamento del filtro RMS e del filtro Picco-Picco.

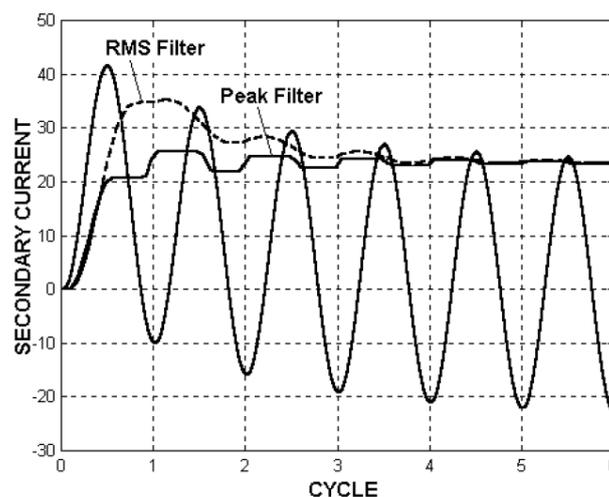


Figura 2-17 Confronto tra la risposta transitoria dei filtri RMS e di Picco-Picco

Al modello di calcolo proposto al § 2.5.1 vengono quindi implementate delle funzioni di campionamento “sliding windows” della corrente secondaria verso la protezione I_2 e delle funzioni di filtraggio per la valutazione del funzionamento del relè di protezione rispetto a:

- valore efficace della fondamentale (RMS 50/60 [Hz] o Cosine Filter);
- valore efficace dell’intera forma d’onda campionata (RMS);
- valori Picco-Picco.

Definendo:

- $\{\mathbf{i}_{2c}\}$ = vettore degli n valori istantanei della corrente campionata nella finestra scorrevole (con valori limitati dal convertitore stesso);
- n = numero di campioni per ciclo.

Si determina, per ogni finestra di campionamento, la DFT di $\{\mathbf{i}_{2c}\}$:

$$\{\mathbf{i}_{fft}\} = DFT(\{\mathbf{i}_{2c}\}) \quad (2.28)$$

Il valore efficace della fondamentale (I_{fft-s}) si determina, per ogni finestra di campionamento, con la seguente funzione:

$$I_{fft-s} = \sqrt{2 \cdot \mathbf{i}_{fft}(1)^2} \quad (2.29)$$

Il valore efficace di tutte le componenti della forma d’onda campionata (I_{fft-r}) si determina, per ogni finestra di campionamento, con la seguente funzione:

$$I_{fft-r} = \sqrt{\sum_0^n \mathbf{i}_{fft}(n)^2} \quad (2.30)$$

Infine il valore Picco-Picco (I_{pk-pk}) della forma d’onda campionata si determina, per ogni finestra di campionamento, con la seguente funzione:

$$I_{pk-pk} = \frac{\max(\{\mathbf{i}_{2c}\}) + \min(\{\mathbf{i}_{2c}\})}{2} \quad (2.31)$$

2.5.3 Esempio caratteristiche di magnetizzazione di un TA

Nel seguito viene riportata una caratteristica di magnetizzazione per TA di classe P.

Questa è dedotta da un rapporto di prova CESI per un TA 800/5 A per reti AT.

Si riporta quindi nella seguente figura la caratteristica di magnetizzazione “reale” del suddetto TA.

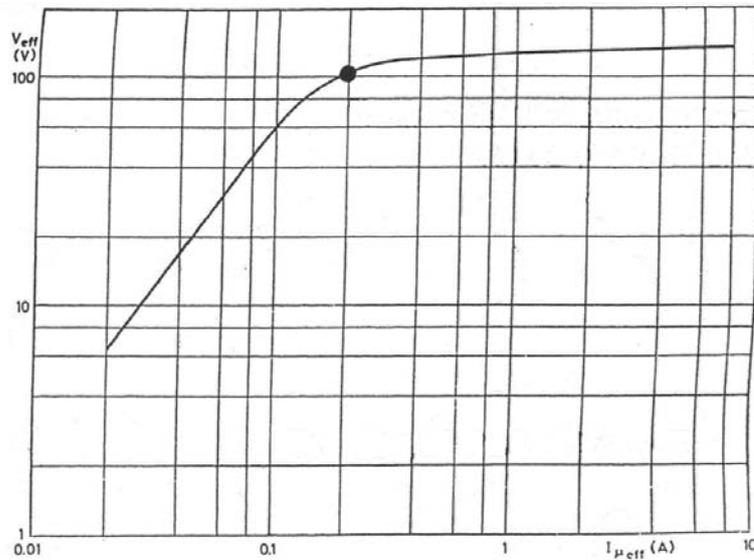


Figura 2-18 Caratteristica reale di un TA 800/5 per reti AT

Dalla precedente figura possono quindi essere ricavate le informazioni relative alla pendenza $1/S$, la tensione di ginocchio E_k e la tensione limite E_{sat} (definibile per la classe 5P o 10P) del TA in oggetto.

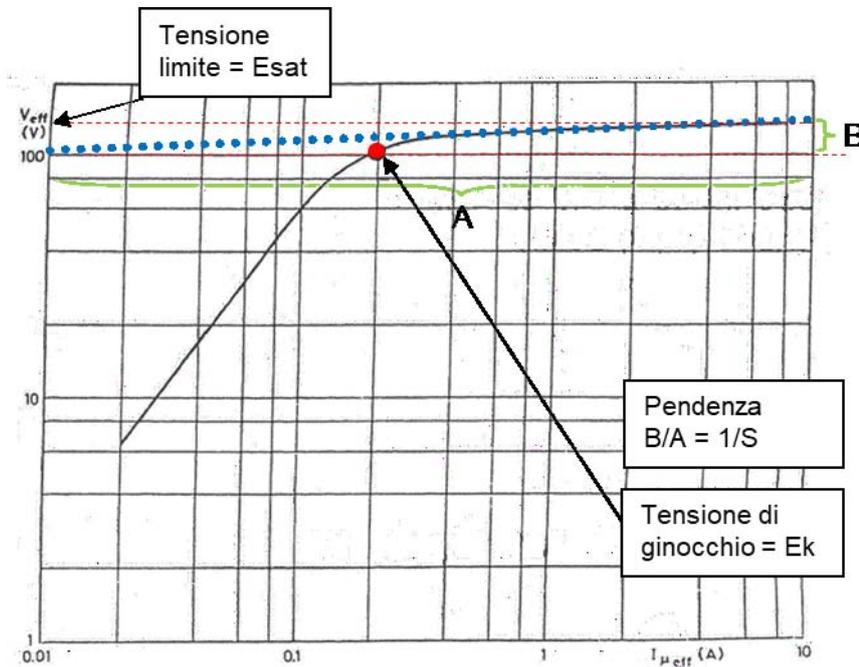


Figura 2-19 Individuazione S , E_k , E_{sat} nella caratteristica reale

Nel caso in oggetto, con TA classe 10P20, $I_{pr}=800$ [A], $I_{sr}=5$ [A], $\varepsilon_c = 10\%$, ALF 20, $I_e = 10$ [A]:

- $S = A/B$, dove $A \approx 10$ [A] e $B \approx 104-100 \approx 4$ [V]; quindi $S \approx 2.5$ [A/V]
- $E_k \approx 100$ [V]
- $E_{sat} \approx 104$ [V]

Si riporta quindi un secondo esempio di caratteristica di magnetizzazione per TA di classe P. Questa è dedotta da un rapporto di prova ABB per un TA 300/5 A – 5P30 – 20 VA - per reti AT.

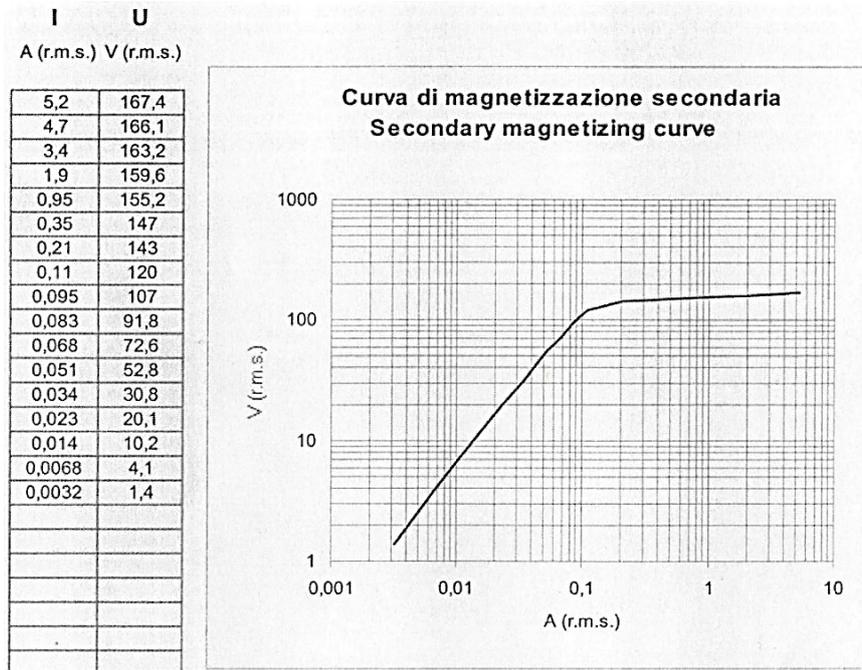


Figura 2-20 Caratteristica reale di un TA 300/5 per reti AT

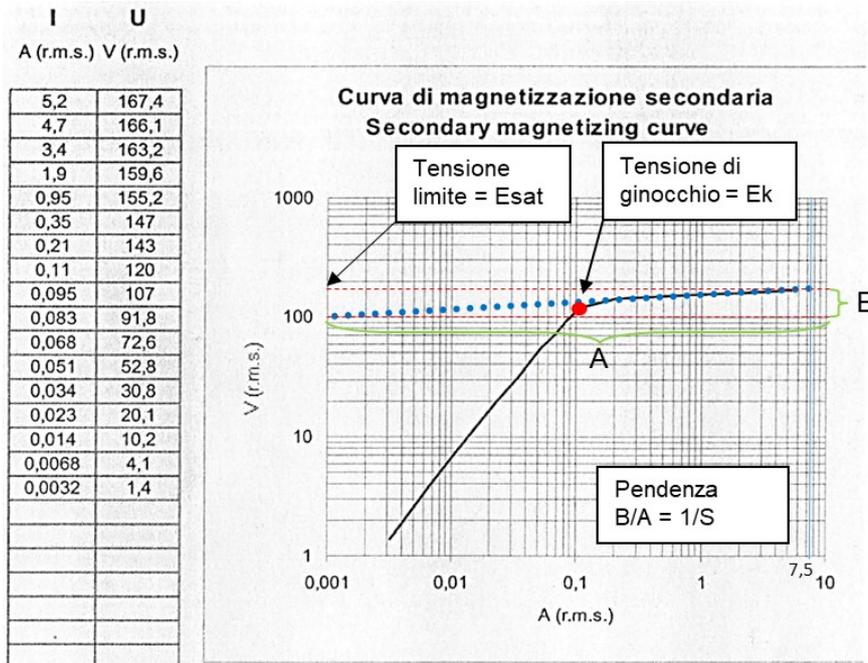


Figura 2-21 Individuazione S , E_k , E_{sat} nella caratteristica reale

Nel caso in oggetto, con TA classe 5P30, $I_{pr}=300$ [A], $I_{sr}=5$ [A], $\epsilon_c = 5\%$, ALF 30, $I_e = 7.5$ [A]:

- $S = A/B$, dove $A \approx 7.5$ [A] e $B \approx 168-100 \approx 68$ [V]; quindi $S \approx 9$ [A/V]
- $E_k \approx 120$ [V]
- $E_{sat} \approx 168$ [V]

3 - Valutazione di un trasformatore amperometrico

3.1 Valutazione iniziale del TA

Per la valutazione iniziale del TA vengono considerati i seguenti punti ⁽¹⁶⁾:

- definizione delle caratteristiche del TA in termini di grandezze elettriche funzionali e di correnti di guasto, con riferimento al punto di installazione;
- valutazione compatibilità del TA, nel punto d'installazione;
- definizione delle caratteristiche di prestazione del TA e precisione dello stesso, in funzione del carico (cavi e protezione) da alimentare;
- verifica del funzionamento del TA in zona lineare;
- valutazione compatibilità con relè di protezione e circuiti di collegamento.

Nel seguito, per ciascuno dei suddetti punti, vengono definite le modalità operative da considerare per la valutazione di adeguatezza del TA.

3.1.1 Definizione delle caratteristiche del TA in funzione del punto d'installazione

Il punto d'installazione del TA è caratterizzato dai seguenti principali dati elettrici:

- tensione nominale del sistema (V_r);
- corrente primaria di lavoro in funzionamento ordinario (I_p);
- valore massimo della componente simmetrica della corrente di guasto (I_{kmax});
- tempo di permanenza del guasto (T_{set});
- costante di tempo (T_p) del sistema (valutata al primario).

Inoltre, va determinata la:

- distanza tra il TA e le protezioni da alimentare (lunghezza dei cavi del circuito secondario).

Con riferimento al TA queste informazioni vanno quindi tradotte in:

- scelta della tensione nominale primaria;
- scelta della corrente primaria nominale;
- scelta della corrente secondaria nominale;

che dovranno poi essere confermate o modificate in funzione delle verifiche di cui ai passi successivi.

E' altresì necessaria una valutazione sulle caratteristiche del TA, in rapporto all'ambiente d'installazione, in termini di temperatura, umidità, aggressività (es. presenza di nebbie saline), etc.

3.1.2 Valutazione compatibilità del TA

Si riportano nel seguito le principali valutazioni sulla compatibilità del TA con la rete elettrica in cui ne sarà prevista l'installazione.

Dal punto di vista del collegamento primario, i TA di protezione sono caratterizzati innanzitutto dai seguenti dati:

- tensione massima U_m ;
- corrente termica nominale permanente I_{cth} (valore normale $1.2 \cdot I_{pr}$);
- corrente termica di breve durata nominale I_{th} , sopportabile per 1s o, in alternativa a questa, l'energia sopportabile dal TA (I^2t);
- corrente nominale dinamica I_{dyn} valore di picco della corrente primaria. Tale valore è normalmente pari a $2.5 \cdot I_{th}$.

Considerando quindi, la corrente di lavoro al primario I_p , la componente simmetrica della corrente primaria di guasto I_{kmax} ed il tempo di permanenza del guasto T_{set} , per la verifica della compatibilità del TA, con riferimento al punto d'installazione, dovranno essere valutati i seguenti elementi:

- U_m che dovrà risultare maggiore o uguale alla tensione nominale del sistema V_r ;
- I_{cth} che dovrà risultare maggiore o uguale a $1.2 \cdot I_p$;
- $I_{th}^2 \cdot 1$ che dovrà risultare maggiore di $I_{kmax}^2 \cdot T_{set}$;
- I_{dyn} che dovrà risultare maggiore di $\sqrt{2} \cdot I_{kmax} \cdot \kappa$.

Dove:

- T_{set} = tempo di interruzione del guasto (tempo di rilevazione e di intervento da parte del relè di protezione, sommato al tempo di estinzione del guasto da parte dell'interruttore);
- $\kappa = (1.02 + 0.98e^{-3R/X})$ (14) (3.1)

3.1.3 Valutazione funzionamento del TA in zona lineare

Il primo approccio per verificare se il TA risulti a rischio di saturazione è quello di determinare quando la tensione impressa al secondario, in caso di sovracorrente di guasto, risulti superiore alla tensione massima in zona lineare (ovvero risulti superiore alla tensione di ginocchio E_k).

Tuttavia il valore E_k non risulta facilmente determinabile se non avendo a disposizione l'effettiva curva di eccitazione del TA.

Un metodo semplificato cautelativamente prevede quindi il calcolo della tensione al secondario E_{ALF} del TA utilizzando i valori nominali:

$$E_{ALF} = ALF \cdot I_{sr} \cdot \sqrt{(R_{ct} + R_b)^2 + X_b^2} \quad (3.2)$$

dove:

- R_{ct} = resistenza interna del TA;
- R_b = resistenza nominale del carico supportato dal TA;
- ALF = precisione nominale limite (Accuracy Limit Factor), definita in fase di scelta e da utilizzare con le valutazioni di seguito proposte.

Si noti che in questo modo, utilizzando il valore nominale del carico $R_b = VA_r / (I_{sr})^2$ il valore di tensione E_{ALF} risulta indipendente dal carico reale del TA. Inoltre, nelle condizioni nominali, si definisce corrente primaria limite $I_{pl} = ALF \cdot I_{pr}$, ovvero la corrente primaria fino alla quale il TA rispetterà le prescrizioni dell'errore composto della classe di precisione (5 o 10%).

Pertanto, il valore di E_{ALF} corrisponde alla tensione limite al secondario del TA per garantire il rispetto delle prescrizioni dell'errore composto.

Inoltre, si evidenzia che E_{sat} , definita al § 2.2.1, è determinabile in via approssimativa con la seguente equazione:

$$E_{sat} = E_{ALF} - R_{ct} \cdot I_{sr} \cdot ALF(1 - \varepsilon_c) \quad (3.3)$$

Quindi, si passa alla determinazione del valore ALF' , corrispondente alle caratteristiche effettive del carico alimentato al secondario del TA.

Il valore di ALF' può essere calcolato come segue:

$$ALF' = \frac{E_{ALF}}{\left[I_{sr} \cdot \sqrt{(R_{ct} + R_b)^2 + X_b^2} \right]} \quad (3.4)$$

dove:

- R_b = resistenza effettiva del carico (relè e connessioni);
- X_b = reattanza effettiva del carico (connessioni).

Con ALF' , si può quindi determinare il valore di corrente primaria limite effettiva I_{pl}' fino alla quale il TA rispetterà le prescrizioni dell'errore composto; più precisamente:

$$I_{pl}' = ALF' \cdot I_{pr} \quad (3.5)$$

dove I_{pr} è la corrente nominale al primario del TA.

Quindi la tensione limite effettiva al secondario E_{ALF}' del TA, alla corrente di guasto al primario I_{kmax} , utilizzando i valori effettivi del carico applicato al TA stesso, risulta:

$$E_{ALF}' = I_{kmax} / k_r \cdot \sqrt{(R_{ct} + R_b)^2 + X_b^2} \quad (3.6)$$

Tuttavia, il limite di questo procedimento sta nel fatto che con questa valutazione si tiene in considerazione il solo valore efficace della componente alternata della corrente, quindi non si considerano gli effetti della componente unidirezionale.

Metodo alternativo

Un metodo alternativo per la valutazione sul funzionamento del TA in zona lineare della caratteristica di magnetizzazione, consiste nella determinazione diretta del fattore limite di precisione effettivo ALF' .

Questo viene determinato mediante la seguente relazione:

$$ALF' = ALF \left(\frac{VA_t + VA_r}{VA_t + VA_c} \right) \quad (3.7)$$

dove:

- VA_t = potenza dissipata nella resistenza secondaria TA alla corrente nominale ($R_{ct} \cdot I_{sr}^2$);
- VA_r = prestazione nominale del TA;
- VA_c = carico effettivo alla corrente nominale (apparati e collegamenti).

Si riporta nel seguito un esempio di valutazione funzionale del TA:

Si consideri un TA di protezione classe P con:

- rapporto di trasformazione: $k_r = I_{pr}/I_{sr} = 100/5$;
- VA_r : 30 [VA];
- classe: 5P30;
- resistenza secondaria TA (R_{ct}): 0.1 [Ω].

Si consideri quindi un relè di protezione con:

- potenza assorbita 1 [VA];
- $R_r = 1/25 = 0.04$ [Ω].

Infine, si considerino i seguenti cavi di collegamento tra TA e Relè (trascurandone la reattanza):

- cavo in rame di sezione: 2.5 [mm²];
- lunghezza complessiva: 6 [m];
- $R_l = 0.06$ [Ω] (a 70 [°C]).

Risulta quindi:

- $VA_t = R_{ct} \cdot I_{sr}^2 = 0.1 \times 5^2 = 2.5$ [VA];
- $VA_r = 30$ [VA];
- $VA_c = (0.04 + 0.06) \times 5^2 = 2.5$ [VA];
- $ALF' = 30 \times ((2.5 + 30) / (2.5 + 2.5)) = 195$;
- $I_{pl}' = ALF' \cdot I_{pr} = 195 \times 100 \text{ A} = 19.5$ [kA].

Ovvero il TA in oggetto, considerando il carico collegato al secondario, risponde nella realtà in modo lineare fino a correnti di 19.5 [kA] e non solo fino ad $ALF \cdot I_{pr} = 30 \times 100 = 3000$ [A].

Considerando quindi i dati del TA del precedente esempio, si riportano nel seguito alcuni diagrammi esplicativi del comportamento dei TA di protezione, considerando:

- carico effettivo VA_c variabile ed I_{kmax} costante;
- corrente di guasto primario I_{kmax} variabile e VA_c costante;
- corrente di guasto primario I_{kmax} variabile e VA_c variabile.

Nella seguente figura è rappresentato l'andamento della f.e.m. secondaria del TA (E_{ALF}') al variare del carico effettivo VA_c (compreso tra 1 e 25 [VA]), con corrente di guasto primario I_{kmax} pari a $I_{Pl} = 3000$ [A].

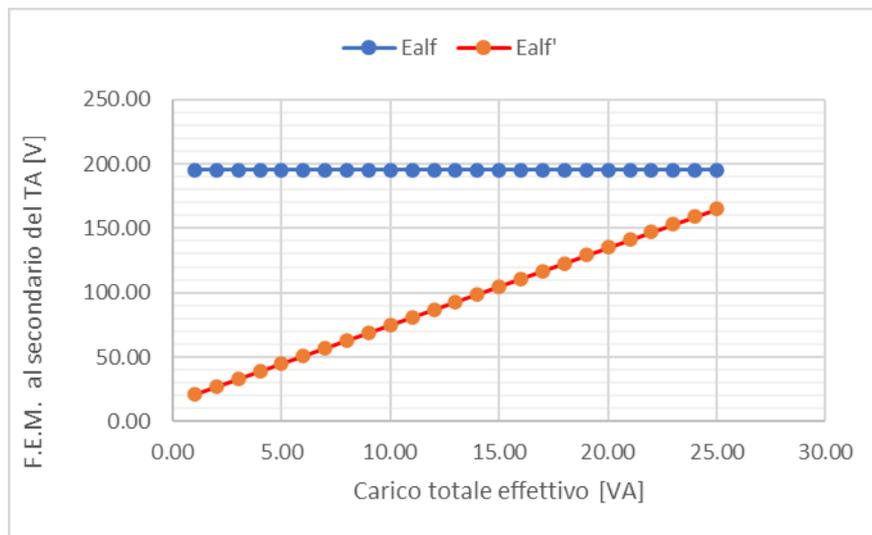


Figura 3-1 – f.e.m. E_{ALF}' al variare del carico effettivo

Nel seguito si riporta il diagramma rappresentante la f.e.m. secondaria del TA (E_{ALF}'), al variare della corrente di guasto primario I_{kmax} (tra 1000 e 5800 [A]), con carico effettivo VA_c pari al carico nominale $VA_r = 30$ [VA]; nel grafico si evidenzia il punto oltre al quale la corrente di guasto porta il TA a lavorare in zona di saturazione.

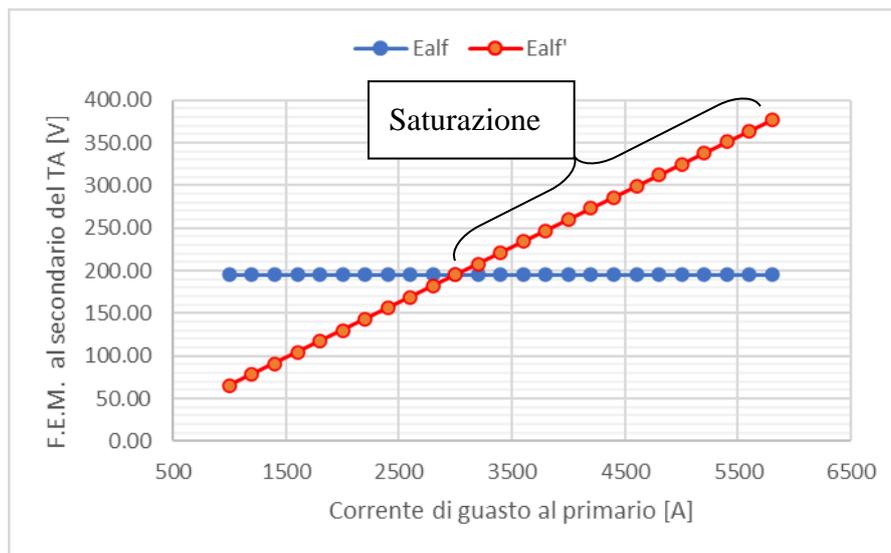


Figura 3-2 - *f.e.m. E_{ALF}' al variare della corrente di guasto*

Infine si riporta il diagramma rappresentante la f.e.m. secondaria del TA (E_{ALF}'), al variare della corrente di guasto primaria I_{kmax} (tra 1000 e 5800 [A]) ed al variare del carico effettivo VA_c (compreso tra 1 e 25 [VA]). Anche in questo grafico si evidenzia il livello oltre al quale la corrente di guasto ed il carico effettivo portano il TA a lavorare in zona di saturazione.

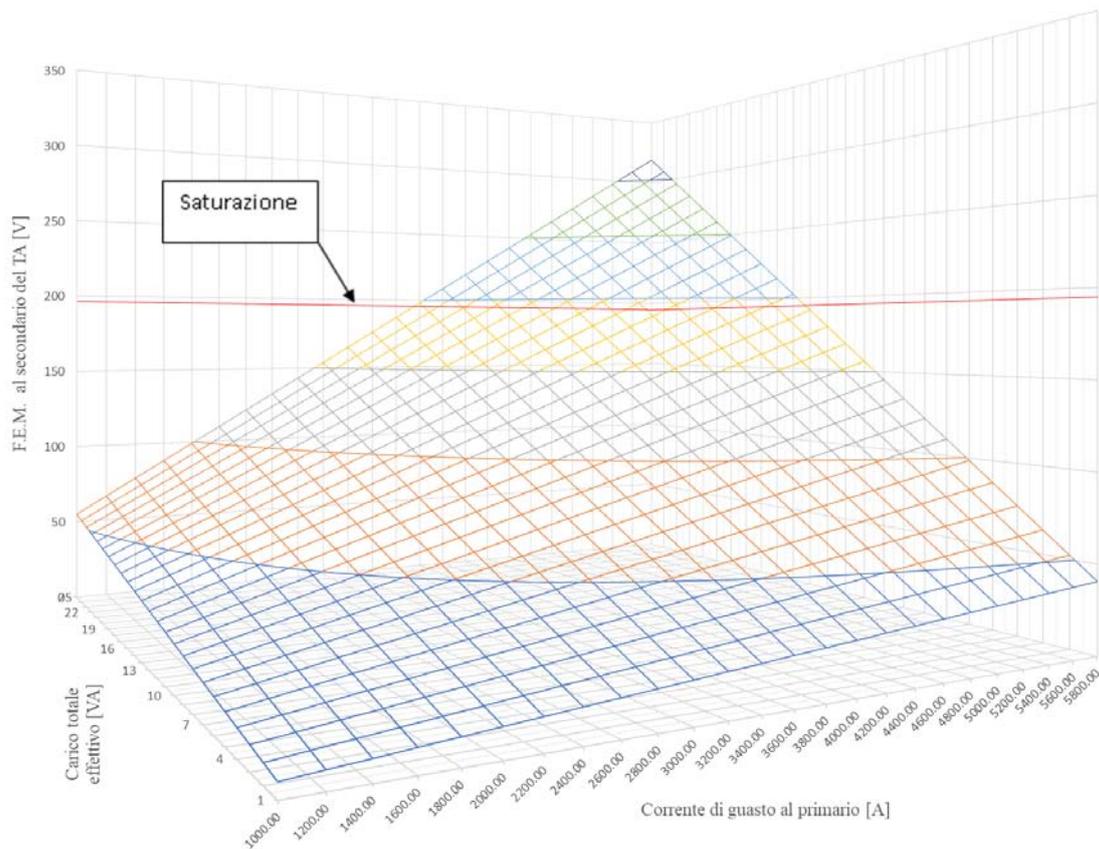


Figura 3-3 - *f.e.m. E_{ALF}' al variare della corrente di guasto e del carico effettivo*

In sintesi, come facilmente intuibile, si evince che un TA con carico effettivo $< VA_r$ è adeguato al funzionamento anche per sovracorrenti maggiori, rispetto alla corrente primaria limite I_{Pl} alla prestazione nominale.

Resistenza dell'avvolgimento secondario del TA

La resistenza R_{ct} è un dato definito dal costruttore del TA, con riferimento alla temperatura di 75°C. Qualora questo dato non risulti disponibile, R_{ct} può essere cautelativamente stimata in eccesso con le seguenti formule empiriche ⁽¹⁴⁾:

$$\text{nel caso di } I_{sr} = 5 \text{ A, } R_{ct} = 0.84 \cdot (I_{sr}/1000) \cdot 0.925 \cdot (1 - VA_r/60) \quad (3.8)$$

$$\text{nel caso di } I_{sr} = 1 \text{ A, } R_{ct} = 4.2 \cdot (I_{sr}/1000) \cdot 0.925 \cdot (1 - VA_r/60) \quad (3.9)$$

3.1.4 Valutazione compatibilità con relè di protezione e circuiti di collegamento

Si riporta nel seguito un metodo di valutazione della compatibilità elettrica tra TA di protezione, relè di protezione e relativi circuiti di collegamento.

Innanzitutto, si sottolinea che gli ingressi amperometrici dei relè di protezione sono caratterizzati dai seguenti dati:

- tensione massima;
- corrente nominale della protezione I_n (tipicamente 1 o 5 [A]);
- corrente efficace massima (I_m), sopportabile per 1 [s] (tipicamente $500 \cdot I_n$ per $I_n = 1$ [A] oppure $100 \cdot I_n$ per $I_n = 5$ [A]); in alternativa alla I_m , l'energia I^2t (tipicamente 250.000 [A²s]);
- sovraccaricabilità dinamica degli ingressi (tipicamente $2.5 \cdot I_m$).

Per quanto concerne il cablaggio dei collegamenti elettrici tra TA e relè:

- tensione massima dei cavi di collegamento;
- valore K^2S^2 dei diversi collegamenti, da confrontare con l'energia I^2t , in rapporto al tempo di permanenza del guasto.

Ad esempio, come già detto, una protezione dal punto di vista termico è idonea a sopportare:

- corrente efficace massima (I_m) per 1 [s] di 100 $I_n = 500$ [A] (con $I_n = 5$ [A]), a cui corrisponde un'energia di 250.000 [A²s];
- sovraccaricabilità dinamica degli ingressi $2.5 I_m = 1.250$ [A].

Si ipotizzi quindi una sovracorrente secondaria I_2 di 625 [A] (corrispondente alla componente simmetrica della corrente primaria di 12.5 [kA] per un TA con $k_r = I_{pr}/I_{sr} = 100/5$), con un tempo di permanenza del guasto di 0.2 [s].

In questo caso la protezione risulta in grado di sopportare la corrente efficace massima di $500/0.2 = 2500$ [A], che risulta infatti > 625 [A] previsti al secondario in caso di guasto. Tuttavia, dal punto di vista dinamico la stessa protezione non risulta idonea in quanto il valore di picco della corrente di

guasto al secondario (valutabile $\sqrt{2} \cdot I_{kmax} \cdot \kappa = \sqrt{2} \cdot 625 \cdot 1.8 \approx 1949$ [A]) risulta maggiore del valore di sovraccaricabilità consentito, pari a $500 \times 2.5 = 1.250$ [A].

Altresì, per quanto riguarda la verifica dei cavi di collegamento tra TA e protezione, sarà necessario valutare l'energia passante I^2t per confrontarla con il valore di tenuta dei cavi K^2S^2 (con $K = 115$, per cavi isolati in PVC ed S la sezione del conduttore in mm^2).

Ad esempio, considerando cavi di sezione 2.5 mm^2 , il valore K^2S^2 risulta $(115 \times 2.5)^2 \approx 82.7 \times 10^3$ [A^2s] pertanto, assumendo un tempo di eliminazione del guasto di 0.2 [s], la corrente ammissibile risulta essere:

$$\sqrt{K^2S^2/t} = \sqrt{82.7 * 10^3 / 0.2} \approx 643 \text{ [A]}$$

superiore alla I_2 di 625 [A], quindi i cavi di collegamento risultano idonei.

3.1.5 Conduttori

Definizione della resistenza di un conduttore

La resistenza (in Ω) di un conduttore con una sezione trasversale costante può essere calcolata con la nota relazione:

$$R_l = \rho \cdot l/A \tag{3.10}$$

dove

- ρ = resistività del materiale conduttore ([$\mu\Omega\text{m}$], dato tipicamente a $+20$ [$^\circ\text{C}$]);
- l = lunghezza del conduttore [m];
- A = area della sezione trasversale del conduttore [mm^2].

Come è noto, la resistenza dei conduttori dipende fortemente dalla temperatura, ovvero quando la temperatura aumenta, la resistenza aumenta. Pertanto, la resistenza di un conduttore deve essere calcolata in corrispondenza della relativa temperatura di funzionamento. Per i calcoli vengono utilizzati i valori di $+70$ o $+90$ [$^\circ\text{C}$], coerentemente con la tipologia di isolamento utilizzata (PVC o Gomma).

Nel caso di conduttori costituiti da metalli puri, come rame ed alluminio, la dipendenza tra resistività e temperatura è quasi lineare, per un ampio intervallo di temperature ($-50 \dots +200$ [$^\circ\text{C}$]). Nella fattispecie, la resistività ad una data temperatura (T_f) viene determinata con la seguente formula:

$$\rho_{xx} = \rho_{20} [1 + \alpha_{20} \cdot (T_f - T_i)] \tag{3.11}$$

dove:

- ρ_{xx} è la resistività del conduttore alla temperatura di xx [$^\circ\text{C}$]

- α_{20} è il coefficiente di temperatura (a 20 [°C])
- T_i è la temperatura iniziale di [20°C]
- T_f è la temperatura finale (70 o 90 [°C])

Per completezza, sono riportati nella seguente tabella i valori di resistività ed i coefficienti di temperatura, per conduttori in rame ed alluminio:

Tabella 3-1 - Resistività e coefficiente di temperatura di rame ed alluminio

Materiale	Resistività ρ_{20} [$\mu\Omega\text{m}$]	Resistività ρ_{70} [$\mu\Omega\text{m}$]	Resistività ρ_{90} [$\mu\Omega\text{m}$]	Coefficiente di temp. α_{20} [K^{-1}]
Rame	0.0178	0.0213	0.0227	0.0039
Alluminio	0.0285	0.0339	0.0361	0.0038

Definizione della reattanza dei conduttori

Come è noto, la reattanza dei conduttori non dipende dalla temperatura e si può esprimere attraverso dei valori tabellari dell'induttanza, specifici per le diverse tipologie di cavo, moltiplicati per la pulsazione di sistema:

$$X_l = L \cdot \omega \quad (3.12)$$

con $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f_r$.

Si riporta quindi nel seguito una tabella con le induttanze chilometriche per diverse tipologie (formazioni) di conduttori ed in funzione del materiale del conduttore.

Tabella 3-2 – Valori tipici di induttanza chilometrica per cavi in rame ed alluminio

Tipologia cavo	Sezione [mm ²]	Materiale	Induttanza [mH/km]	Materiale	Induttanza [mH/km]
unipolare	1.5	Rame	0.535	Alluminio	0.535
unipolare	2.5	Rame	0.494	Alluminio	0.497
unipolare	4	Rame	0.455	Alluminio	0.455
unipolare	6	Rame	0.430	Alluminio	0.430
unipolare	10	Rame	0.379	Alluminio	0.379
unipolare	16	Rame	0.357	Alluminio	0.357
bipolare	1.5	Rame	0.376	Alluminio	0.376
bipolare	2.5	Rame	0.347	Alluminio	0.347
bipolare	4	Rame	0.322	Alluminio	0.322
bipolare	6	Rame	0.304	Alluminio	0.304
bipolare	10	Rame	0.274	Alluminio	0.274

Tipologia cavo	Sezione [mm ²]	Materiale	Induttanza [mH/km]	Materiale	Induttanza [mH/km]
bipolare	16	Rame	0.260	Alluminio	0.260
tripolare	1.5	Rame	0.376	Alluminio	0.376
tripolare	2.5	Rame	0.347	Alluminio	0.347
tripolare	4	Rame	0.322	Alluminio	0.322
tripolare	6	Rame	0.304	Alluminio	0.304
tripolare	10	Rame	0.274	Alluminio	0.274
tripolare	16	Rame	0.260	Alluminio	0.260

Connessioni dei TA

Si riporta nel seguito una tabella con le principali modalità di connessione utilizzate per i TA di protezione:

No.	Circuit designation Measured variable	Circuit	No.	Circuit designation Measured variable	Circuit
1	Y connection Phase current		4	Delta connection Phase-to-phase	
2	V connection Phase current		5	Longitudinal differential Differential current	
3	Holmgren Neutral current				

Figura 3-4 – Tipiche modalità di connessione TA

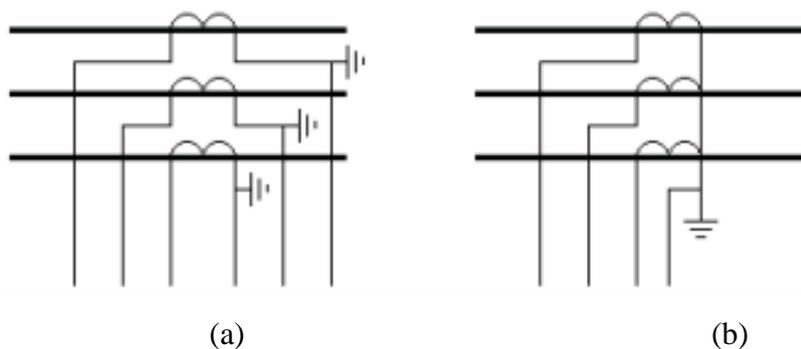


Figura 3-5 Connessione a 6 fili e connessione a 4 fili

Ad esempio, nel caso d'utilizzo della connessione a 6 fili (Figura 3-5 (a)) la lunghezza totale dei collegamenti da considerare nella valutazione del carico al secondario del TA sarà il doppio della distanza tra il TA ed il relè.

Altresì, nel caso d'utilizzo della connessione a 4 fili (Figura 3-5 (b)), con conduttore comune di ritorno, assumendo una terna equilibrata di correnti, la lunghezza totale dei collegamenti da considerare nella valutazione del carico al secondario del TA sarà pari ad 1 volta la distanza tra il TA ed il relè. Questa regola si applica ovviamente solo nel caso di guasto trifase equilibrato. Nel caso di guasto bifase la lunghezza del collegamento sarà considerata pari a 2 volte la distanza tra il TA ed il relè.

3.1.6 Carico dei dispositivi di protezione

Il carico costituito dai dispositivi di protezione, in termini di potenza apparente e/o impedenza d'ingresso, è un dato definito dal costruttore della protezione stessa.

Nel caso questo dato non sia noto è possibile utilizzare i dati contenuti nella seguente tabella:

Tabella 3-3 – Potenza assorbita di diversi utilizzatori

Table 3.1. Consumption of some Apparatuses Powered by CTs	
Apparatus	VA at In.
Ammeters	
Indicators	0.25 to 2
Recorders	1.5 to 9
Counters	0.5 to 3
Wattmeters	
Indicators	1 to 3
Recorders	1.5 to 8
Phase meters	
Indicators	2 to 6
Recorders	6 to 12
Maximeters	3
Power converters	3 to 6
Relays	
Overcurrent, inv. time	5 to 8
Overcurrent, timed	1 to 5
Overcurrent, instantaneous	1 to 10
Directional	1.5 to 10
Power, timed	1.5 to 3
Trip switch	3 to 12
Distance	6 to 20
Regulators	10 to 150

Si riportano quindi nel seguito alcuni esempi di impedenza d'ingresso (considerando la sola R_p) per diversi apparati commerciali di protezione:

- relè ABB serie SPACOM:
 - corrente nominale 5A $R_p \leq 0.02$ [Ω] (in termini di potenza apparente 0.5 [VA]);
 - corrente nominale 1A $R_p \leq 0.10$ [Ω] (in termini di potenza apparente 0.1 [VA]).
- relè THYTRONIC serie Pro-N e Smart-Line:
 - corrente nominale 5A $R_p \leq 0.016$ [Ω] (in termini di potenza apparente 0.4 [VA]);
 - corrente nominale 1A $R_p \leq 0.002$ [Ω] (in termini di potenza apparente 0.002 [VA]).

- relè THYTRONIC serie NA80:
 - corrente nominale 5A $R_p \leq 0.04$ [Ω] (in termini di potenza apparente 1 [VA]);
 - corrente nominale 1A $R_p \leq 0.002$ [Ω] (in termini di potenza apparente 0.002 [VA]).
- relè SIEMENS serie SIPROTEC 5:
 - corrente nominale 5A $R_p \leq 0.004$ [Ω] (in termini di potenza apparente 0.1 [VA]);
 - corrente nominale 1A $R_p \leq 0.1$ [Ω] (in termini di potenza apparente 0.1 [VA]).
- relè SCHNEIDER serie SEPAM serie 20 e 40:
 - corrente nominale 5A $R_p \leq 0.02$ [Ω] (in termini di potenza apparente 0.5 [VA]);
 - corrente nominale 1A $R_p \leq 0.02$ [Ω] (in termini di potenza apparente 0.02 [VA]).

3.1.7 Stima tempo di saturazione:

Poiché la corrente in un'induttanza non può cambiare valore istantaneamente, i TA impiegano del tempo per saturare. Questo è un fattore importante nella progettazione e nell'applicazione di relè di protezione.

Lo standard IEEE C37.110 ⁽⁸⁾ fornisce un'equazione conservativa per stimare il tempo di saturazione (trascurando l'induttanza del carico):

$$T_{sat} = -T_p \cdot \ln \left[1 - \frac{E_{sat} - I_s \cdot \sqrt{(R_{ct} + R_b)^2 + X_b^2}}{\omega \cdot T_p \cdot I_s \cdot \sqrt{(R_{ct} + R_b)^2 + X_b^2}} \right] \quad (3.13)$$

dove:

- T_{sat} è il tempo di saturazione;
- T_p è la costante di tempo del sistema primario;
- E_{sat} è la tensione di eccitazione corrispondente ad I_e alle condizioni nominali;
- I_s è la corrente primaria divisa per il rapporto di trasformazione del TA;
- R_{ct} è la resistenza dell'avvolgimento secondario;
- R_b e X_b sono rispettivamente la resistenza e la reattanza del carico (cavi + protezione).

Il parametro T_{sat} permette quindi di verificare, in linea di principio, l'adeguatezza dei tempi di acquisizione e di azione per la protezione di massima corrente, rispetto alla stima del tempo di saturazione.

3.2 Foglio di calcolo per la valutazione dei TA

In considerazione di quanto precedentemente definito, si è predisposto un foglio di calcolo MS EXCEL per la valutazione iniziale dei TA, che di seguito si presenta.

Il foglio di calcolo è organizzato nelle seguenti parti:

- dati di ingresso della rete da proteggere;
- dati di ingresso del trasformatore amperometrico da verificare;
- dati di ingresso protezione;
- dati di ingresso cavi di collegamento;
- valori calcolati per il trasformatore amperometrico;
- valori calcolati per i cavi di collegamento;
- valori calcolati per il carico totale;
- verifica del trasformatore amperometrico;
- verifica della protezione e connessioni.

Nel seguito vengono quindi descritte le suddette parti, riportando un esempio di compilazione del foglio di calcolo, nel caso di TA installato come dal seguente schema ed adeguatamente dimensionato.

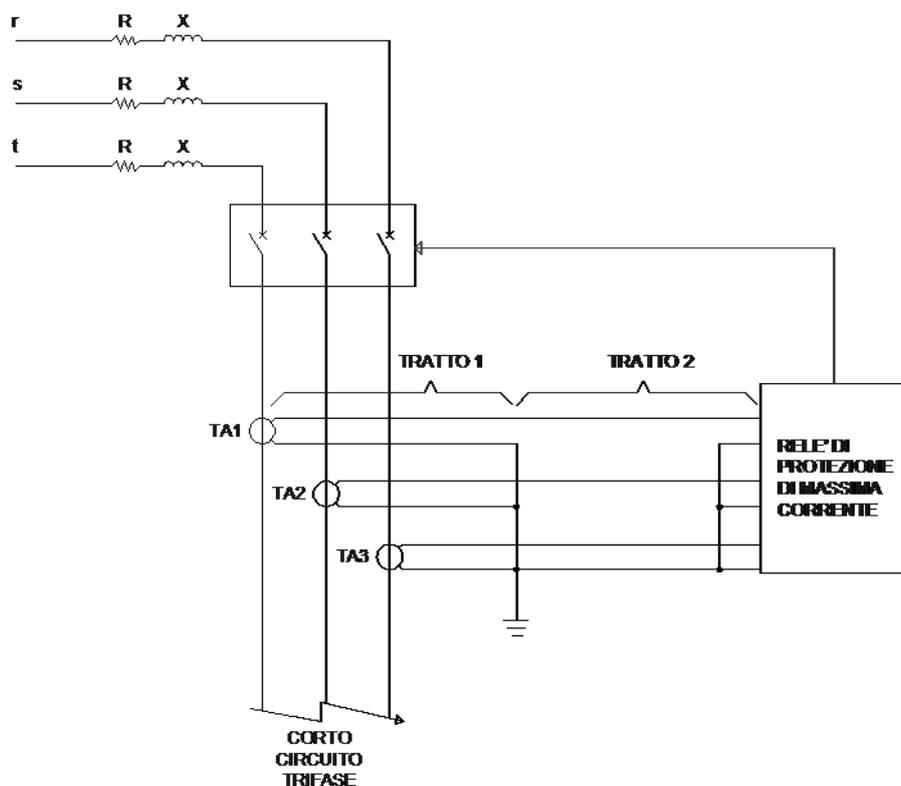


Figura 3-6 – Schema tipico di collegamento TA e protezione

Dati di ingresso della rete da proteggere:

Verifica TA - xxxxx				
Descrizione	Simb.	Valore		
Dati di ingresso della rete da proteggere				
Frequenza [Hz]	f	50		
Resistenza sistema [p.u.]	R	0,1		
Reattanza sistema [p.u.]	X	1		
Corrente di lavoro al primario [A]	Ip	150		
		1F-c.c.	2F-c.c.	3F-c.c.
Corrente di guasto al primario [A] (*)	Ikmax	10	6928	8000
Tempo di intervento del sistema di protezione [s] (**)	Tset	0,17	0,17	0,17
Tempo massimo tollerabile di estinzione del guasto [s] (***)	Tmax	0,2	0,2	0,2

Note:

(*) La corrente di corto circuito calcolata nel punto di connessione del TA

(**) Il tempo è comprensivo del tempo di intervento dell'interruttore

(***) Tempo tollerabile dal sistema

Inoltre:

- 1F-c.c. individua un corto circuito monofase –terra;
- 2F-c.c. individua un corto circuito bifase;
- 3F-c.c. individua un corto circuito trifase.

Dati di ingresso del trasformatore amperometrico:

Dati di ingresso del trasformatore amperometrico da verificare		
Corrente nominale primario Ipr [A]	Ipr	200
Corrente nominale secondario Isr [A]	Isr	1
Prestazione nominale [VA]	VAr	5
Classe di precisione		5P
ALF	ALF	10
Corrente termica ad Is [A]	Ith	60000
Corrente nominale dinamica [A]	Idyn	150000
Corrente termica nominale permanente [A]	Icth	240
Resistenza TA [Ω] (*)	Rct	nd
Inverso pendenza curva saturazione TA	S	25
F.E.M. di saturazione del TA [V] (*)	Esat	nd

Nota (*) nel caso il dato sia indicato dal costruttore

Dati di ingresso protezione:

Dati di ingresso protezione		
Tipologia		Protezione
Modello		Thytronic NA80
Carico ingresso di corrente della protezione [VA]	VAp	0,04
Fattore di sovraccarico ammissibile (Is) dell'ingresso corrente della protezione (riferito alla Isr)	kth	100
Campionamenti per periodo [n]	np	64
Corrente massima campionabile (riferita a In) [A]	Iconv	200
Corrente di intervento della protezione (rif. al primario) [A]	Itrip	4000
Note		50-51

Dati di ingresso cavi di collegamento:

Dati di ingresso cavi di collegamento				
Tratto 1 : posizione		Cavo interno		
Tratto 1 : lunghezza cavo (m)	L1	1		
Tratto 1 : sezione cavo (mm ²)	S1	4		
Tratto 1 : materiale conduttore		rame		
Tratto 1 : Isolamento		PVC		
Tratto 1 : coefficiente K del cavo	K1	115		
Tratto 1 : induttanza chilometrica del cavo [mH/km]		0,32	0,32	0,32
		1F-c.c.	2F-c.c.	3F-c.c.
Tratto 1 : numero conduttori		2	2	2
Tratto 2 : posizione		Cavo esterno		
Tratto 2 : lunghezza cavo (m)	L2	30		
Tratto 2 : sezione cavo (mm ²)	S2	2,5		
Tratto 2 : materiale conduttore		rame		
Tratto 2 : Isolamento		Gomma		
Tratto 2 : coefficiente K del cavo	K2	143		
Tratto 2 : induttanza chilometrica del cavo [mH/km]		0,49	0,49	0,49
		1F-c.c.	2F-c.c.	3F-c.c.
Tratto 2 : numero conduttori		2	2	1

Valori calcolati per il trasformatore amperometrico:

Valori calcolati per il trasformatore amperometrico		
Resistenza TA [Ω] (*)	Rct	0,87
Carico effettivo resistenza TA [VA] a Isr	VA _t	0,87

Nota (*) nel caso il dato sia indicato dal costruttore

Valori calcolati per i cavi di collegamento:

Valori calcolati per i cavi di collegamento				
Resistività alla temperatura di esercizio °C tratto 1 [$\Omega\text{m}/\text{mm}^2$]	ρ_1	0,0213		
Resistività alla temperatura di esercizio °C tratto 2 [$\Omega\text{m}/\text{mm}^2$]	ρ_2	0,0227		
Resistenza conduttore tratto 1 [Ω/cond]		0,01		
Resistenza conduttore tratto 2 [Ω/cond]		0,27		
		1F-c.c.	2F-c.c.	3F-c.c.
Resistenza totale conduttori tratto 1 [Ω]	R11	0,01	0,01	0,01
Resistenza totale conduttori tratto 2 [Ω]	R12	0,54	0,54	0,27
Reattanza totale conduttori tratto 1 [Ω]	X11	0,00	0,00	0,00
Reattanza totale conduttori tratto 2 [Ω]	X12	0,00	0,00	0,00
Carico dei cavi a Isr - tratto 1 (VA)		0,01	0,01	0,01
Carico dei cavi a Isr - tratto 2 (VA)		0,54	0,54	0,27

Valori calcolati per il carico totale:

Valori calcolati per il carico totale				
		1F-c.c.	2F-c.c.	3F-c.c.
Resistenza totale [Ω]	R _c	0,59	0,59	0,32
Reattanza totale [Ω]	X _c	0,00	0,00	0,00
Carico totale effettivo [VA] a Isr	VA _c	0,63	0,63	0,36
Carico totale effettivo / Carico nominale [%]		12,69%	12,69%	7,25%

Verifica del trasformatore amperometrico:

Verifica del trasformatore amperometrico:				
		1F-c.c.	2F-c.c.	3F-c.c.
VERIFICA DEL CARICO (*)		POSITIVA	POSITIVA	POSITIVA
ALF'	ALF'	39,04	39,04	47,66
Massima corrente primaria tollerabile a ALF' (ALF'·I _{pr}) [A]	I _{max}	7808	7808	9532
Corrente di picco al primario [A]	I _{pk}	25	17107	19754
VERIFICA del TA alla corrente di lavoro (**)		POSITIVA	POSITIVA	POSITIVA
VERIFICA TENUTA del TA alla corrente di guasto (***)		POSITIVA	POSITIVA	POSITIVA
F.E.M. limite al secondario del TA [V]	E _{alf}	58,7	58,7	58,7
F.E.M. al secondario del TA alla corrente di guasto [V]	E _{alf} '	0,1	50,7	47,7
F.E.M. di saturazione del TA [V]	E _{sat}	50,4	50,4	50,4
CONDIZIONI DI LAVORO DEL TA (****)		NON SATURATO	NON SATURATO	NON SATURATO
Costante di tempo del sistema (L/R/ω) [s]	T _p	0,032	0,032	0,032
Stima del tempo di saturazione [s]	T _{sat}	0,000	0,000	0,000

Nota

(*) Verifica POSITIVA nel caso di carico effettivo minore del carico nominale del TA

(**) Verifica POSITIVA se $I_{cth} > I_p$

(***) Verifica POSITIVA se $I_{kmax}^2 \cdot (T_{set}) < I_{th}^2$ e $I_{pk} < I_{dyn}$

(****) Non SATURATO se $E_{ALF} > E_{ALF}'$

Verifica della protezione e connessioni

Verifica della protezione e connessioni				
		1F-c.c.	2F-c.c.	3F-c.c.
Corrente all'ingresso della protezione (con linearità) [A]		0,1	34,6	40,0
Sovraccarico termico per 1s (I _{sr} ·k _{th}) [A]	I _m	100	100	100
Energia specifica al secondario del TA in caso di guasto [I ² t]	E1	0,0	204,0	272,0
Sovraccario transitorio ammissibile della protezione (I ² t) [A ² s]	E2	10000	10000	10000
Sovraccario transitorio ammissibile delle connessioni (I ² t) [A ² s]	E2	127806	127806	127806
VERIFICA sovraccarico della protezione e connessioni (*)		TOLLERABILE	TOLLERABILE	TOLLERABILE
VERIFICA TENUTA della protezione alla corrente di guasto (**)		POSITIVA	POSITIVA	POSITIVA

Nota

(*) Tollerabile se $E2 > E1$ e $E3 > E1$

(**) Verifica POSITIVA se $2.5 \cdot I_m > I_{pk}/k_r$

Per un test più completo del foglio di calcolo, nel seguito si riporta un caso in cui il TA non risulta in prima valutazione adeguatamente dimensionato.

Riutilizzando i dati del precedente esempio, ciò viene evidenziato aumentando la corrente di corto circuito trifase da 8 a 15 [kA]:

Dati di INPUT

Verifica TA - xxxxx				
Descrizione	Simb.	Valore		
Dati di ingresso della rete da proteggere				
Frequenza [Hz]	f	50		
Resistenza sistema [p.u.]	R	0,1		
Reattanza sistema [p.u.]	X	1		
Corrente di lavoro al primario [A]	I _p	150		
		1F-c.c.	2F-c.c.	3F-c.c.
Corrente di guasto al primario [A] (*)	I _{kmax}	10	12990	15000
Tempo di intervento del sistema di protezione [s] (**)	T _{set}	0,17	0,17	0,17
Tempo massimo tollerabile di estinzione del guasto [s] (***)	T _{max}	0,2	0,2	0,2
Dati di ingresso del trasformatore amperometrico da verificare				
Corrente nominale primario I _{pr} [A]	I _{pr}	200		
Corrente nominale secondario I _{sr} [A]	I _{sr}	1		
Prestazione nominale [VA]	V _{Ar}	5		
Classe di precisione		5P		
ALF	ALF	10		
Corrente termica ad 1s [A]	I _{th}	60000		
Corrente nominale dinamica [A]	I _{dyn}	150000		
Corrente termica nominale permanente [A]	I _{cth}	240		
Resistenza TA [Ω] (*)	R _{ct}	nd		
Inverso pendenza curva saturazione TA	S	25		
F.E.M. di saturazione del TA [V] (*)	E _{sat}	nd		
Dati di ingresso protezione				
Tipologia		Protezione		
Modello		Thytronic NA80		
Carico ingresso di corrente della protezione [VA]	V _{Ap}	0,04		
Fattore di sovraccarico ammissibile (1s) dell'ingresso corrente della protezione (riferito alla I _{sr})	k _{th}	100		
Campionamenti per periodo [n]	n _p	64		
Corrente massima campionabile (riferita a I _n) [A]	I _{conv}	200		
Corrente di intervento della protezione (rif. al primario) [A]	I _{trip}	4000		
Note		50-51		
Dati di ingresso cavi di collegamento				
Tratto 1 : posizione		Cavo interno		
Tratto 1 : lunghezza cavo (m)	L1	1		
Tratto 1 : sezione cavo (mm ²)	S1	4		
Tratto 1 : materiale conduttore		rame		
Tratto 1 : Isolamento		PVC		
Tratto 1 : coefficiente K del cavo	K1	115		
Tratto 1 : induttanza chilometrica del cavo [mH/km]		0,32	0,32	0,32
		1F-c.c.	2F-c.c.	3F-c.c.
Tratto 1 : numero conduttori		2	2	2
Dati di ingresso cavi di collegamento				
Tratto 2 : posizione		Cavo esterno		
Tratto 2 : lunghezza cavo (m)	L2	30		
Tratto 2 : sezione cavo (mm ²)	S2	2,5		
Tratto 2 : materiale conduttore		rame		
Tratto 2 : Isolamento		Gomma		
Tratto 2 : coefficiente K del cavo	K2	143		
Tratto 2 : induttanza chilometrica del cavo [mH/km]		0,49	0,49	0,49
		1F-c.c.	2F-c.c.	3F-c.c.
Tratto 2 : numero conduttori		2	2	1

Dati di CALCOLO e VERIFICHE:

Valori calcolati per il trasformatore amperometrico				
Resistenza TA [Ω] (*)	Rct	0,87		
Carico effettivo resistenza TA [VA] a Isr	VA _t	0,87		
Valori calcolati per i cavi di collegamento				
Resistività alla temperatura di esercizio °C tratto 1 [$\Omega\text{m}/\text{mm}^2$]	ρ_1	0,0213		
Resistività alla temperatura di esercizio °C tratto 2 [$\Omega\text{m}/\text{mm}^2$]	ρ_2	0,0227		
Resistenza conduttore tratto 1 [Ω/cond]		0,01		
Resistenza conduttore tratto 2 [Ω/cond]		0,27		
		1F-c.c.	2F-c.c.	3F-c.c.
Resistenza totale conduttori tratto 1 [Ω]	R11	0,01	0,01	0,01
Resistenza totale conduttori tratto 2 [Ω]	R12	0,54	0,54	0,27
Reattanza totale conduttori tratto 1 [Ω]	X11	0,00	0,00	0,00
Reattanza totale conduttori tratto 2 [Ω]	X12	0,00	0,00	0,00
Carico dei cavi a Isr - tratto 1 (VA)		0,01	0,01	0,01
Carico dei cavi a Isr - tratto 2 (VA)		0,54	0,54	0,27
Valori calcolati per il carico totale				
		1F-c.c.	2F-c.c.	3F-c.c.
Resistenza totale [Ω]	Rc	0,59	0,59	0,32
Reattanza totale [Ω]	Xc	0,00	0,00	0,00
Carico totale effettivo [VA] a Isr	VA _c	0,63	0,63	0,36
Carico totale effettivo / Carico nominale [%]		12,69%	12,69%	7,25%
Verifica del trasformatore amperometrico:				
		1F-c.c.	2F-c.c.	3F-c.c.
VERIFICA DEL CARICO (*)		POSITIVA	POSITIVA	POSITIVA
ALF'	ALF'	39,04	39,04	47,66
Massima corrente primaria tollerabile a ALF' (ALF' x I _{pr}) [A]	I _{max}	7808	7808	9532
Corrente di picco al primario [A]	I _{pk}	25	32076	37038
VERIFICA del TA alla corrente di lavoro (**)		POSITIVA	POSITIVA	POSITIVA
VERIFICA TENUTA del TA alla corrente di guasto (***)		POSITIVA	POSITIVA	POSITIVA
F.E.M. limite al secondario del TA [V]	E _{alf}	58,7	58,7	58,7
F.E.M. al secondario del TA alla corrente di guasto [V]	E _{alf'}	0,1	95,0	89,4
F.E.M. di saturazione del TA [V]	E _{sat}	50,4	50,4	50,4
CONDIZIONI DI LA VORO DEL TA (****)		NON SATURATO	SATURATO	SATURATO
Costante di tempo del sistema (L/R/ω) [s]	T _p	0,032	0,032	0,032
Stima del tempo di saturazione [s]	T _{sat}	0,000	0,038	0,037
Verifica della protezione e connessioni				
		1F-c.c.	2F-c.c.	3F-c.c.
Corrente all'ingresso della protezione (con linearità) [A]		0,1	65,0	75,0
Sovraccarico termico per 1s (I _s *k _{th}) [A]	I _m	100	100	100
Energia specifica al secondario del TA in caso di guasto [I ² t]	E1	0,0	717,2	956,3
Sovraccario transitorio ammissibile della protezione (I ² t) [A ² s]	E2	10000	10000	10000
Sovraccario transitorio ammissibile delle connessioni (I ² t) [A ² s]	E2	127806	127806	127806
VERIFICA sovraccarico della protezione e connessioni (*)		TOLLERABILE	TOLLERABILE	TOLLERABILE
VERIFICA TENUTA della protezione alla corrente di guasto (**)		POSITIVA	POSITIVA	POSITIVA

In questo caso il TA, con la corrente di guasto primaria trifase indicata, sta lavorando in zona di saturazione. Tuttavia, la valutazione del sovraccarico ammissibile per le protezioni e le connessioni risulta POSITIVO. In questo caso è pertanto opportuno approfondire l'adeguatezza funzionale del TA con strumenti di calcolo più precisi, quali ad esempio il codice di calcolo MatLab riportato nel seguente capitolo.

3.3 Codice di calcolo MATLAB

Il codice di calcolo sviluppato con il software MATLAB ®, per il presente lavoro di tesi, prevede l'acquisizione dei principali dati di input individuati nel foglio di calcolo MS EXCEL ® previsto per la valutazione preliminare del TA, con particolare riferimento alla condizione di guasto trifase (eventualmente modificabile).

Successivamente, il codice di calcolo procede con la simulazione di una sovracorrente di guasto al tempo t_{guast} , caratterizzata dalla componente simmetrica I_{kmax} , dal rapporto X/R di sistema, dalla costante di tempo del sistema T_p e dalla conseguente componente unidirezionale.

Il codice di calcolo prevede quindi l'applicazione del "metodo di calcolo semplificato", di cui al precedente § 2.5, per la definizione delle forme d'onda della corrente secondaria (I_2), corrente eccitazione (I_e), f.e.m. (E_s), flusso (λ). Il calcolo di queste componenti è eseguito con una data risoluzione impostabile (ad esempio 512 punti per periodo).

Quindi, il codice MATLAB ® simula il campionamento "scorrevole" (sliding window), della forma d'onda della corrente secondaria (I_2), operato nel relè di protezione con una risoluzione (definibile) di 16, 32, 64 o 128 punti per periodo, tipica per le protezioni di sistemi MT/AT.

Per ogni vettore campionato è successivamente calcolato un vettore contenente la relativa trasformata discreta di Fourier (DFT).

Quindi ogni vettore trasformata compone gli elementi del vettore $\{I_{fft1}\}$.

Per ogni elemento del suddetto vettore sono quindi calcolati:

- il valore efficace della sola componente fondamentale alla frequenza di sistema (l'insieme dei valori calcolati compone il vettore $\{I_{fft4}\}$);
- il valore efficace di tutte le componenti di ogni elemento del vettore $\{I_{fft1}\}$ (l'insieme dei valori calcolati compone il vettore $\{I_{fft3}\}$).

Inoltre, dal vettore campionato sono stati definiti i valori di Picco-Picco, che in linea con quanto presentato nel § 2.5.2, determinano un elemento del vettore $\{I_{peak}\}$.

Il codice di calcolo permette inoltre la definizione di una soglia di "saturazione" del convertitore A/D (in termini di corrente I_{mconv}) che ovviamente determina un taglio dei picchi minimi e massimi dei valori campionati di corrente.

Infine, nello stesso codice MATLAB ® è effettuato il confronto tra i suddetti risultati calcolati e la soglia di attivazione (I_{trip}) della protezione di massima corrente, al fine di determinare:

- l'effettivo superamento della soglia, da parte della protezione e relativo tempo in cui ciò accade;
- il tempo di attivazione della protezione, in riferimento alle modalità di elaborazione dei segnali campionati.

Il codice di calcolo permette la rappresentazione, in appositi diagrammi in funzione del tempo, delle:

- forma d'onda della corrente al primario del TA;
- forme d'onda delle correnti al secondario del TA;
- forma d'onda del flusso di eccitazione nel TA;

- forma d'onda della tensione E_s al secondario del TA;
- forme d'onda dei valori campionati di corrente, dalla protezione di massima corrente;
- diagramma delle attivazioni della protezione di massima corrente.

Il codice MATLAB ®, sviluppato per questo lavoro di tesi, è riportato nell'**Appendice 1** del presente documento. Si riportano invece, nel seguito di questo capitolo, gli output grafici prodotti dal codice di calcolo, commentandone il contenuto.

Il caso presentato è elaborato a partire dai dati di input sotto riportati.

Tabella 3-4 – *Dati di input esempio di calcolo*

Variabile	u.m.	Valore	Note
f	Hz	50	frequenza sistema
$camp$	n	512	punti calcolati curve corrente / flusso
$camp2$	n	64	punti campionati da protezione
$Ikmax$	A	15000	componente simmetrica della corrente guasto primario
$tguast$	s	0.040	tempo di guasto
$Imconv$	A	200	corrente massima del convertitore A/D dalla protezione
ALF		10	prestazione TA ..P (ALF)
S		25	inverso pendenza curva saturazione
I_p	A	150	corrente di linea al primario
I_{pr}	A	200	corrente nominale primario
I_{sr}	A	1	corrente nominale secondario
VAr	VA	5	prestazione nominale
CE	%	5	errore composto
R_l	Ω	0.86	resistenza cavi
X_l	Ω	0.016	reattanza cavi
R_r	Ω	0.04	resistenza protezione
L_r	H	0.0001	induttanza protezione
$alfa0$	rad	0	sfasamento corrente di linea al primario
L	H	0.0032	induttanza sistema
R	Ω	0.1	resistenza sistema
$Fini$	Wb	0.0001	flusso iniziale
E_{sat}	V	50.4	f.e.m. di eccitazione corrispondente alla I_{pl}
I_{trip}	A	6000	corrente di TRIP della protezione – riferita al primario
R_{ct}	Ω	0.87	Resistenza TA (da calcolare o dato del produttore)

Il programma inizialmente calcola le componenti simmetrica, unidirezionale e totale (somma delle precedenti) della corrente di guasto al primario, al tempo di guasto definito nei dati di input. La rappresentazione dell'andamento delle correnti copre un numero di cicli definito dall'utente. L'andamento è rappresentato nelle seguenti figure su 10 e su 4 cicli.

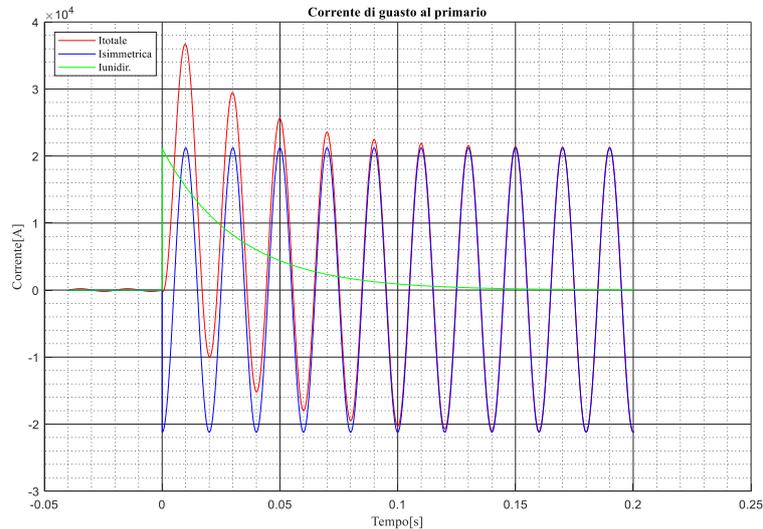


Figura 3-7 – Andamento della corrente al primario del TA - per 10 cicli

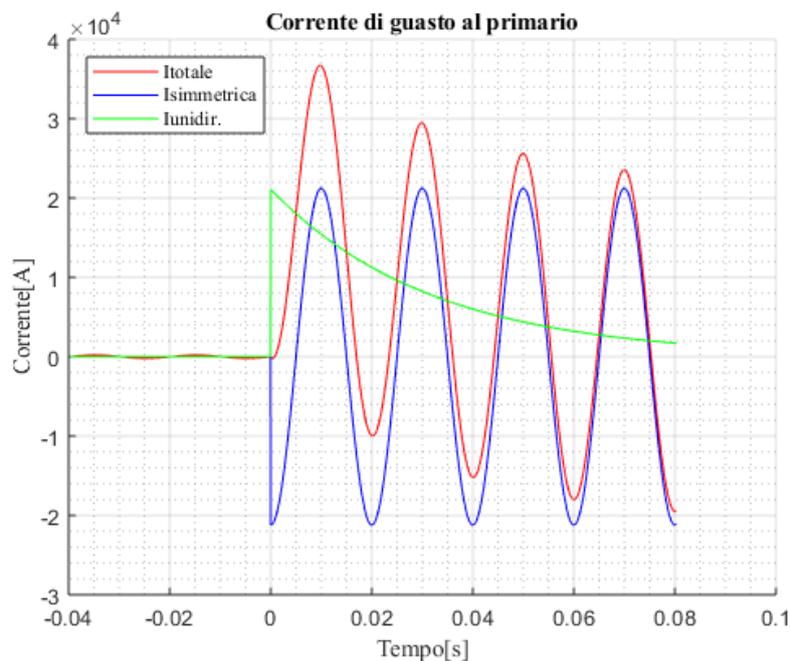


Figura 3-8 – Andamento della corrente al primario del TA - per 4 cicli

Successivamente il programma calcola le componenti ideale i_s , eccitazione i_e e di carico i_2 (differenza delle precedenti) della corrente di guasto al secondario.

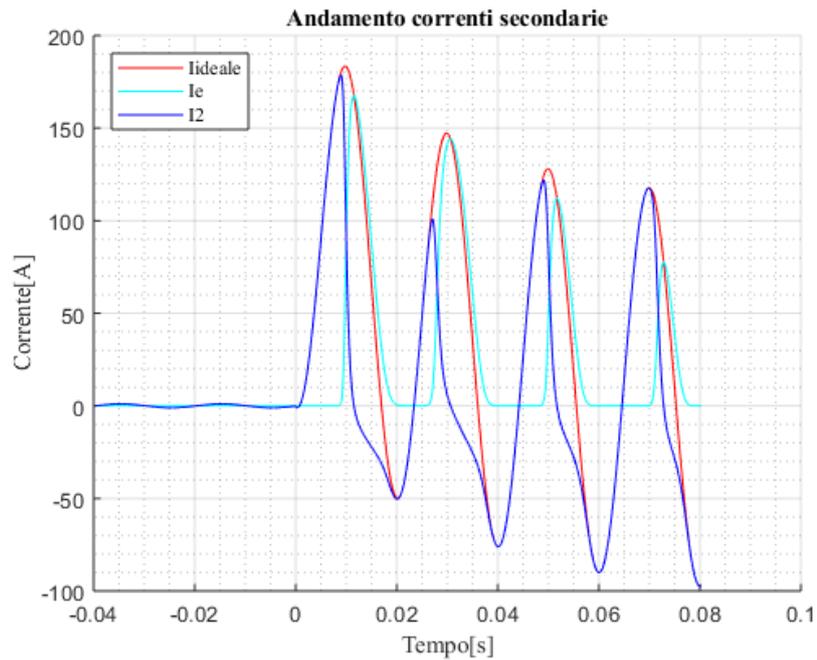


Figura 3-9 – Andamento della corrente al secondario del TA

Nella seguente figura è rappresentato il valore calcolato della tensione al secondario del TA e_s , come prodotto tra la corrente di carico i_2 e l'impedenza del carico Z_b .

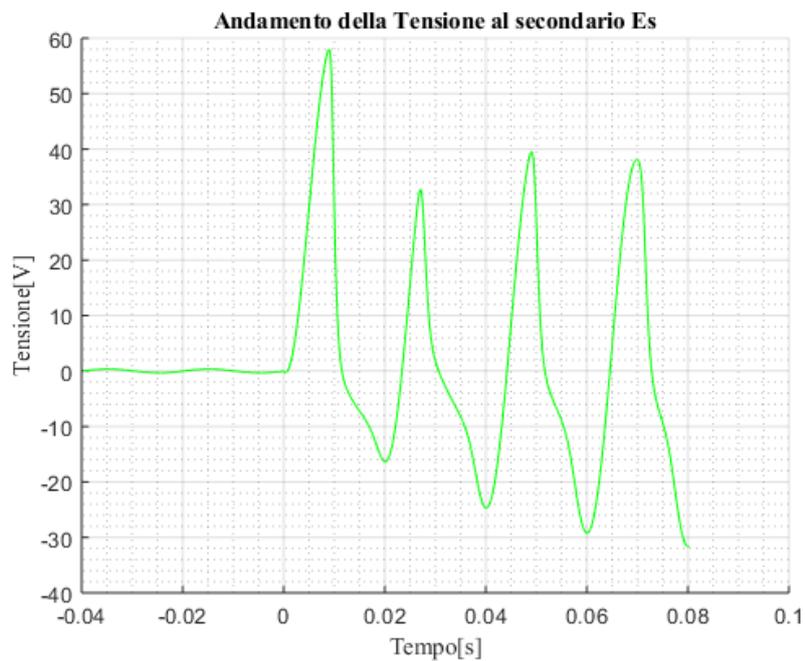


Figura 3-10 – Andamento della tensione al secondario del TA

Nella seguente figura è rappresentato il valore calcolato del flusso di magnetizzazione del TA.

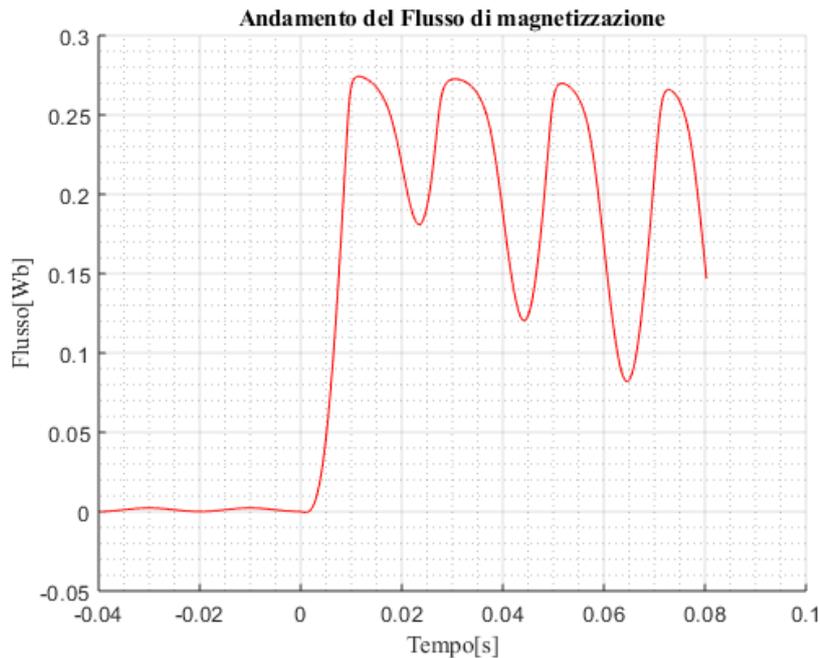


Figura 3-11 – Andamento del flusso di eccitazione del TA

Quindi, il programma simula il campionamento, che il relè di protezione effettua sulla corrente i_2 , ne calcola il valore efficace della sola componente simmetrica (fondamentale), di tutte le componenti (RMS della fondamentale, della componente d.c. e di tutte le armoniche) e calcola il valore Picco-Picco.

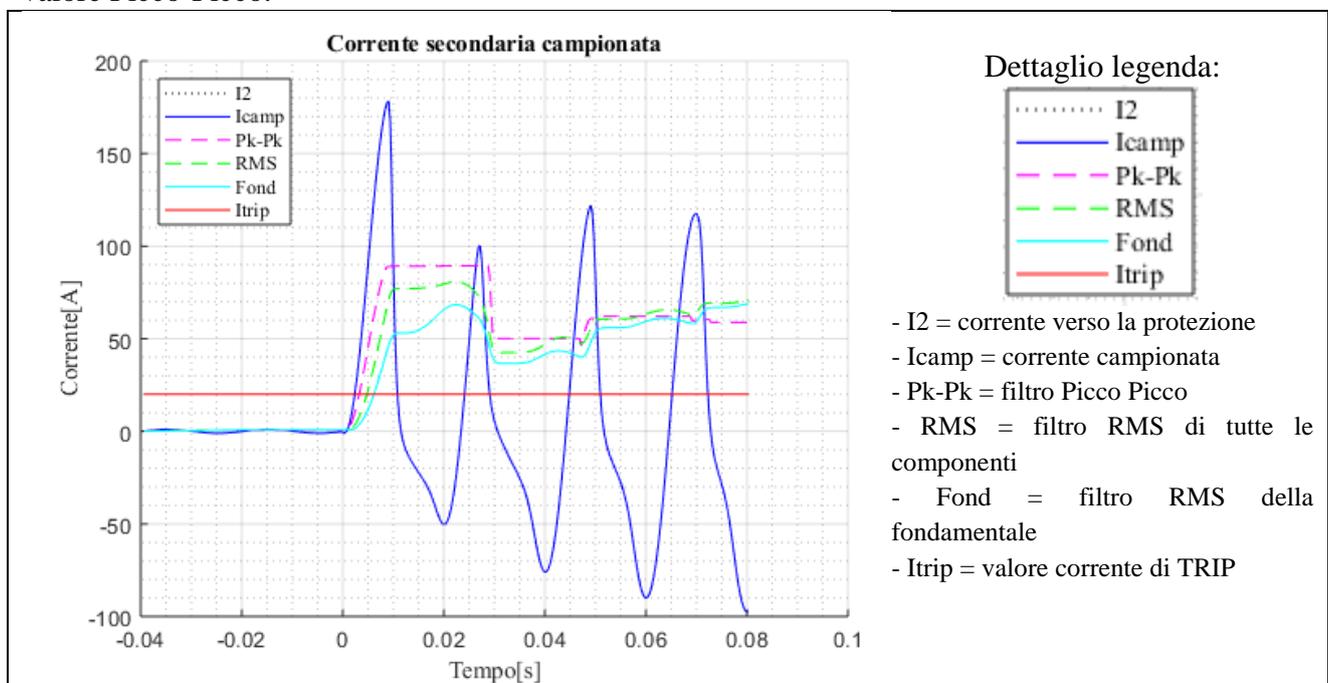


Figura 3-12 – Andamento della corrente campionata dal relè di protezione

Nel seguito il codice confronta i valori istantanei del valore efficace della sola componente fondamentale, il valore RMS di tutte le componenti, il valore Picco-Picco, con il valore della

corrente di Trip (o in generale di avviamento della soglia) della protezione. Determina quindi il tempo di rilevazione del superamento della soglia di TRIP del relè di protezione (eventualmente da sommare al tempo di intervento minimo impostabile nella protezione, normalmente indicato come intervento istantaneo, ma di fatto non nullo). Dal seguente grafico è quindi possibile individuare:

- l'effettivo intervento della protezione di massima corrente per superamento della soglia di Trip;
- il tempo dell'intervento della protezione.

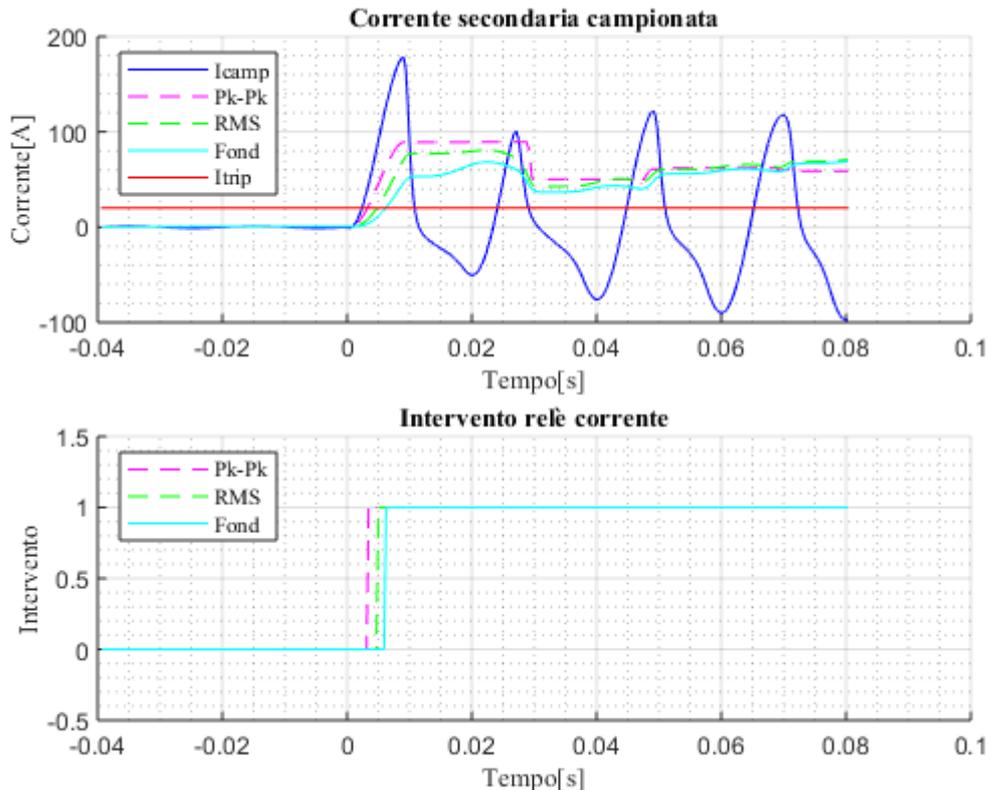


Figura 3-13 – Modalità di intervento del relè di protezione

Il software di calcolo determina il tempo di rilevazione del guasto che, per il caso in oggetto vale:

- con la componente fondamentale, la protezione rileva il corto circuito con tempo di 0.0063 [s];
- con il filtro RMS, la protezione rileva il corto circuito con un tempo di 0.0050 [s];
- con la tecnica Picco-Picco, la protezione rileva il corto circuito con un tempo di 0.0036 [s].

Si noti che nel caso di superamento della soglia di Trip per un tempo inferiore al tempo minimo previsto dalla protezione (tipicamente 30 [ms]) o per un tempo inferiore alla soglia di ritardo (definita dall'utente es. 120 [ms]), considerando opportunamente il tempo di ricaduta di cui si è accennato nel §1.2.2 (generalmente ≤ 40 [ms]), non può esserci l'intervento del Relè di protezione.

3.4 Confronto del codice di calcolo MatLab con un tool commerciale

Si riporta nel seguito una validazione del codice MatLab, confrontandolo con i risultati di calcolo di un tool commerciale, sviluppato con MS EXCEL e denominato CT-SATuration CALCULATOR – ERLPhase – nel seguito per brevità (CTSAT).

Il confronto è stato eseguito utilizzando i dati di input dell'esempio di calcolo nel paragrafo precedente, Tabella 3-4.

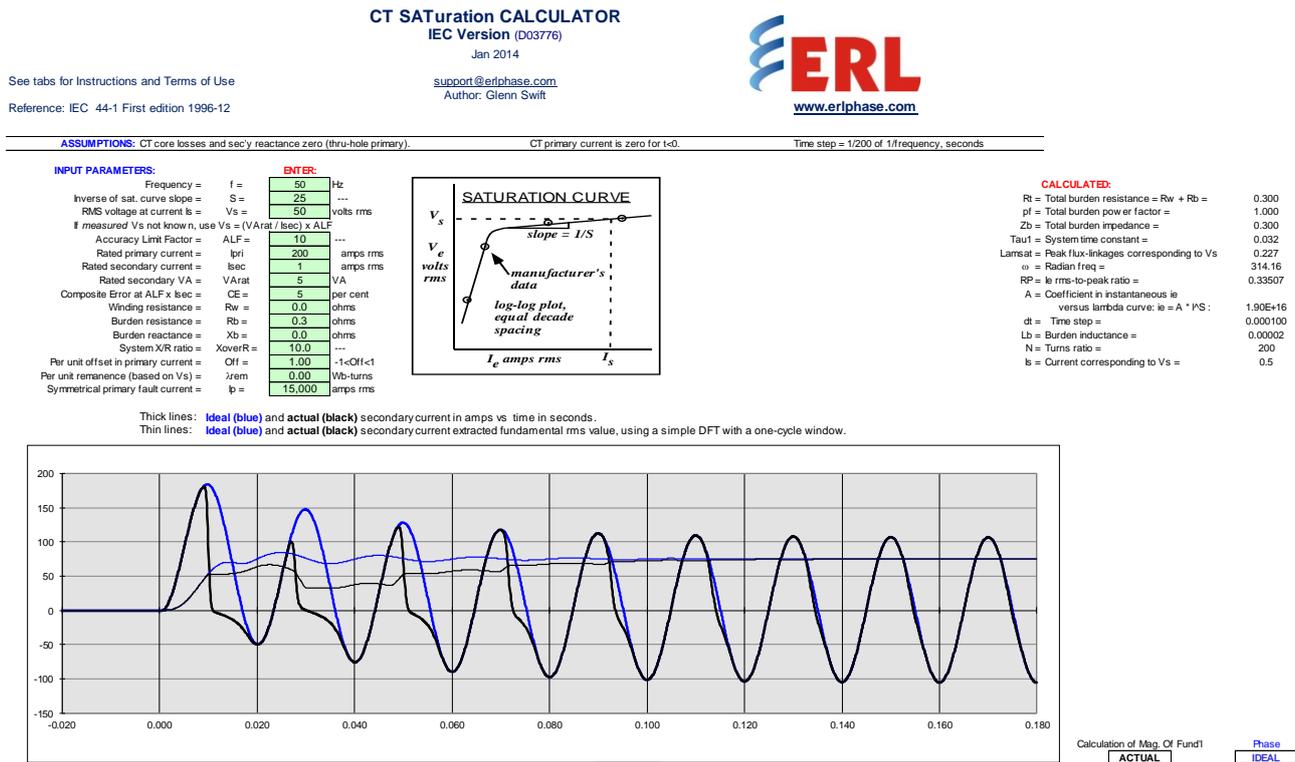


Figura 3-14 – Layout del foglio di calcolo CTSAT

INPUT PARAMETERS:	ENTER:	
Frequency =	f =	50 Hz
Inverse of sat. curve slope =	S =	25 ---
RMS voltage at current Is =	Vs =	50 volts rms
If measured Vs not known, use Vs = (VArat / Isec) x ALF		
Accuracy Limit Factor =	ALF =	10 ---
Rated primary current =	Ipri =	200 amps rms
Rated secondary current =	Isec =	1 amps rms
Rated secondary VA =	VArat =	5 VA
Composite Error at ALF x Isec =	CE =	5 per cent
Winding resistance =	Rw =	0.0 ohms
Burden resistance =	Rb =	0.3 ohms
Burden reactance =	Xb =	0.0 ohms
System X/R ratio =	XoverR =	10.0 ---
Per unit offset in primary current =	Off =	1.00 -1<Off<1
Per unit remanence (based on Vs) =	λrem =	0.00 Wb-turns
Symmetrical primary fault current =	Ip =	15,000 amps rms

Figura 3-15 – Particolare tabella dati di input CTSAT

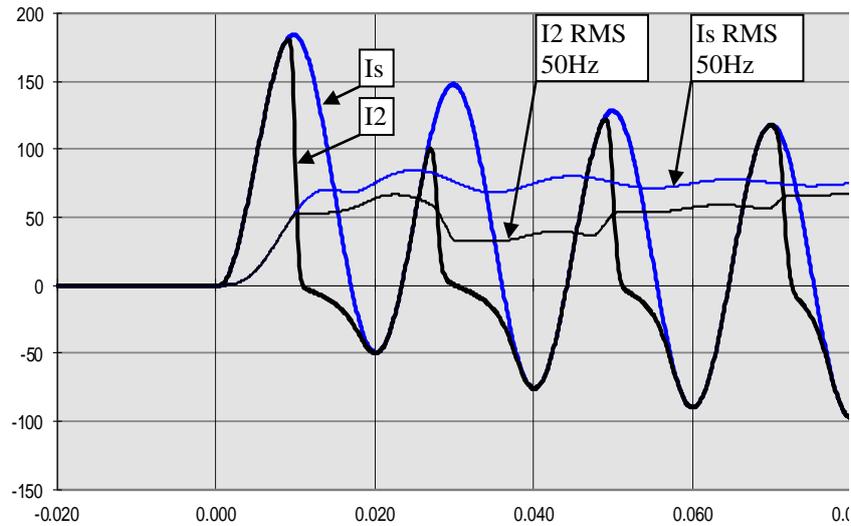


Figura 3-16 – Particolare risultati di calcolo con software CTSAT

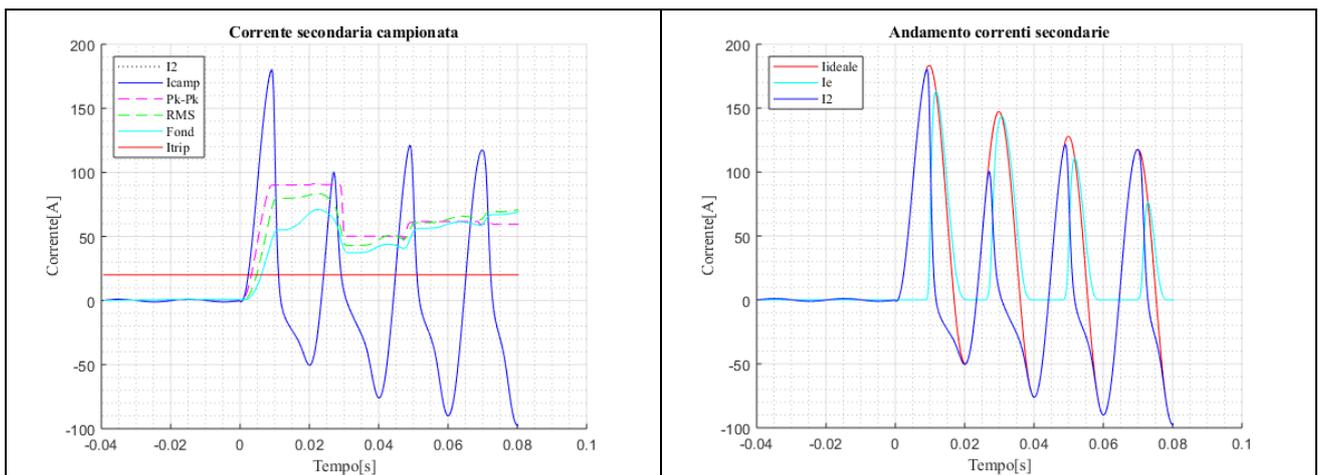


Figura 3-17 – Risultati di calcolo con il codice di calcolo MatLab

Dal confronto con le precedenti figure, i risultati di calcolo con i due programmi si possono ritenere comparabili in quanto:

- le forme d'onda della corrente secondaria I_2 e del valore efficace della fondamentale appaiono del tutto simili, ovvero i valori istantanei sono sovrapponibili;
- i valori efficaci della fondamentale, da confrontare con il valore di soglia, sono comparabili per i due casi (≈ 55 [A] dopo 0.01 [s] e ≈ 70 [A] dopo 0.02 [s]).

Si ritiene che il codice di calcolo, sviluppato con il presente lavoro di tesi, risulti uno strumento certamente più flessibile rispetto al foglio di calcolo CTSAT.

Il codice di calcolo MatLab, rispetto al suddetto tool commerciale, garantisce infatti i seguenti vantaggi funzionali:

- possibilità di implementare qualsiasi forma d'onda della corrente di guasto al primario, non soltanto sinusoidale;
- selezione del tempo di guasto e della fase della corrente di guasto;
- calcolo e visualizzazione del flusso di magnetizzazione del TA;
- calcolo e visualizzazione della tensione al secondario del TA;
- calcolo della DFT del segnale convertito della I_2 , in rapporto alle prestazioni di campionamento della protezione (frequenza di campionamento);
- calcolo e visualizzazione del valore rilevato dalla protezione utilizzando filtri RMS e di Picco, con possibilità di implementare altri filtri;
- implementazione della funzione di saturazione, per elevate correnti, del convertitore A/D della protezione;
- calcolo e visualizzazione dei tempi di rilevazione del guasto, con la preventiva definizione della soglia di TRIP;
- possibilità di avere a disposizione i vettori relativi a $\{I_{fft1}\}$ (DFT del segnale campionato), $\{I_{fft3}\}$ (RMS di tutte le componenti), $\{I_{fft4}\}$ (RMS della fondamentale), e $\{I_{peak}\}$ (valori di Picco-Picco), per ulteriori analisi e confronti con altri strumenti.

Dati di INPUT

Verifica TA -motore pompa acqua 500 kW				
Descrizione	Simb.	Valore		
Dati di ingresso della rete da proteggere				
Frequenza [Hz]	f	50		
Resistenza sistema [p.u.]	R	0,05		
Reattanza sistema [p.u.]	X	1		
Corrente di lavoro al primario [A]	Ip	135		
		1F-c.c.	2F-c.c.	3F-c.c.
Corrente di guasto al primario [A] (*)	Ikmax	10	34641	40000
Tempo di intervento del sistema di protezione [s] (**)	Tset	0,07	0,07	0,07
Tempo massimo tollerabile di estinzione del guasto [s] (***)	Tmax	0,2	0,2	0,2
Dati di ingresso del trasformatore amperometrico da verificare				
Corrente nominale primario Ipr [A]	Ipr	200		
Corrente nominale secondario Isr [A]	Isr	5		
Prestazione nominale [VA]	VAr	20		
Classe di precisione		5P		
ALF	ALF	20		
Corrente termica ad 1s [A]	Ith	60000		
Corrente nominale dinamica [A]	Idyn	150000		
Corrente termica nominale permanente [A]	Icth	240		
Resistenza TA [Ω] (*)	Rct	nd		
Inverso pendenza curva saturazione TA	S	25		
F.E.M. di saturazione del TA [V] (*)	Esat	nd		
Dati di ingresso protezione				
Tipologia		Protezione		
Modello		Thytronic NA80		
Carico ingresso di corrente della protezione [VA]	VAp	0,04		
Fattore di sovraccarico ammissibile (1s) dell'ingresso corrente della protezione (riferito alla Isr)	kth	100		
Campionamenti per periodo [n]	np	64		
Corrente massima campionabile (riferita a In) [A]	Iconv	200		
Corrente di intervento della protezione (rif. al primario) [A]	Itrip	2000		
Note		50-51		
Dati di ingresso cavi di collegamento				
Tratto 1 : posizione		Cavo interno		
Tratto 1 : lunghezza cavo (m)	L1	1		
Tratto 1 : sezione cavo (mm ²)	S1	2,5		
Tratto 1 : materiale conduttore		rame		
Tratto 1 : Isolamento		PVC		
Tratto 1 : coefficiente K del cavo	K1	115		
Tratto 1 : induttanza chilometrica del cavo [mH/km]		0,32	0,32	0,32
		1F-c.c.	2F-c.c.	3F-c.c.
Tratto 1 : numero conduttori		2	2	2
Tratto 2 : posizione		Cavo esterno		
Tratto 2 : lunghezza cavo (m)	L2	50		
Tratto 2 : sezione cavo (mm ²)	S2	2,5		
Tratto 2 : materiale conduttore		rame		
Tratto 2 : Isolamento		Gomma		
Tratto 2 : coefficiente K del cavo	K2	143		
Tratto 2 : induttanza chilometrica del cavo [mH/km]		0,49	0,49	0,49
		1F-c.c.	2F-c.c.	3F-c.c.
Tratto 2 : numero conduttori		2	2	1

Dati di CALCOLO e VERIFICHE:

Valori calcolati per il trasformatore amperometrico				
Resistenza TA [Ω] (*)	Rct	0,13		
Carico effettivo resistenza TA [VA] a Isr	VA _t	3,16		
Valori calcolati per i cavi di collegamento				
Resistività alla temperatura di esercizio °C tratto 1 [$\Omega\text{m}/\text{mm}^2$]	ρ_1	0,0213		
Resistività alla temperatura di esercizio °C tratto 2 [$\Omega\text{m}/\text{mm}^2$]	ρ_2	0,0227		
Resistenza conduttore tratto 1 [Ω/cond]		0,01		
Resistenza conduttore tratto 2 [Ω/cond]		0,45		
		1F-c.c.	2F-c.c.	3F-c.c.
Resistenza totale conduttori tratto 1 [Ω]	R _{I1}	0,02	0,02	0,02
Resistenza totale conduttori tratto 2 [Ω]	R _{I2}	0,91	0,91	0,45
Reattanza totale conduttori tratto 1 [Ω]	X _{I1}	0,00	0,00	0,00
Reattanza totale conduttori tratto 2 [Ω]	X _{I2}	0,01	0,01	0,01
Carico dei cavi a Isr - tratto 1 (VA)		0,43	0,43	0,43
Carico dei cavi a Isr - tratto 2 (VA)		22,66	22,66	11,33
Valori calcolati per il carico totale				
		1F-c.c.	2F-c.c.	3F-c.c.
Resistenza totale [Ω]	R _c	0,92	0,92	0,47
Reattanza totale [Ω]	X _c	0,01	0,01	0,01
Carico totale effettivo [VA] a Isr	VA _c	23,17	23,17	11,84
Carico totale effettivo / Carico nominale [%]		115,83%	115,83%	59,18%
Verifica del trasformatore amperometrico:				
		1F-c.c.	2F-c.c.	3F-c.c.
VERIFICA DEL CARICO (*)		NEGATIVA	NEGATIVA	POSITIVA
ALF'	ALF'	17,59	17,59	30,89
Massima corrente primaria tollerabile a ALF' (ALF' \times l _{pr}) [A]	I _{max}	704	704	1235
Corrente di picco al primario [A]	I _{pk}	26	91292	105415
VERIFICA del TA alla corrente di lavoro (**)		POSITIVA	POSITIVA	POSITIVA
VERIFICA TENUTA del TA alla corrente di guasto (***)		POSITIVA	POSITIVA	POSITIVA
F.E.M. limite al secondario del TA [V]	E _{alf}	92,6	92,6	92,6
F.E.M. al secondario del TA alla corrente di guasto [V]	E _{alf'}	0,3	910,5	598,2
F.E.M. di saturazione del TA [V]	E _{sat}	80,6	80,6	80,6
CONDIZIONI DI LA VORO DEL TA (****)		NON SATURATO	SATURATO	SATURATO
Costante di tempo del sistema (L/R/ ω) [s]	T _p	0,064	0,064	0,064
Stima del tempo di saturazione [s]	T _{sat}	0,000	0,076	0,073
Verifica della protezione e connessioni				
		1F-c.c.	2F-c.c.	3F-c.c.
Corrente all'ingresso della protezione (con linearità) [A]		0,3	866,0	1000,0
Sovraccarico termico per 1s (I _{sr} \times k _{th}) [A]	I _m	500	500	500
Energia specifica al secondario del TA in caso di guasto [I ² t]	E ₁	0,0	52500,0	70000,0
Sovraccario transitorio ammissibile della protezione (I ² t) [A ² s]	E ₂	250000	250000	250000
Sovraccario transitorio ammissibile delle connessioni (I ² t) [A ² s]	E ₂	82656	82656	82656
VERIFICA sovraccarico della protezione e connessioni (*)		TOLLERABILE	TOLLERABILE	TOLLERABILE
VERIFICA TENUTA della protezione alla corrente di guasto (**)		POSITIVA	NEGATIVA	NEGATIVA

Dalla suddetta tabella si evince che, in queste condizioni funzionali, i TA lavorano in zona di forte saturazione, nel caso di guasto trifase e bifase a valle del TA stesso.

Inoltre, la verifica di tenuta della protezione alla corrente di guasto appare negativa in quanto $2.5 \cdot I_m < I_{pk}/k_r$.

Tralasciano inizialmente la precedente valutazione negativa, volendo comunque valutarne l'adeguatezza, con il codice di calcolo MatLab si ottengono i seguenti risultati, nel caso di guasto trifase:

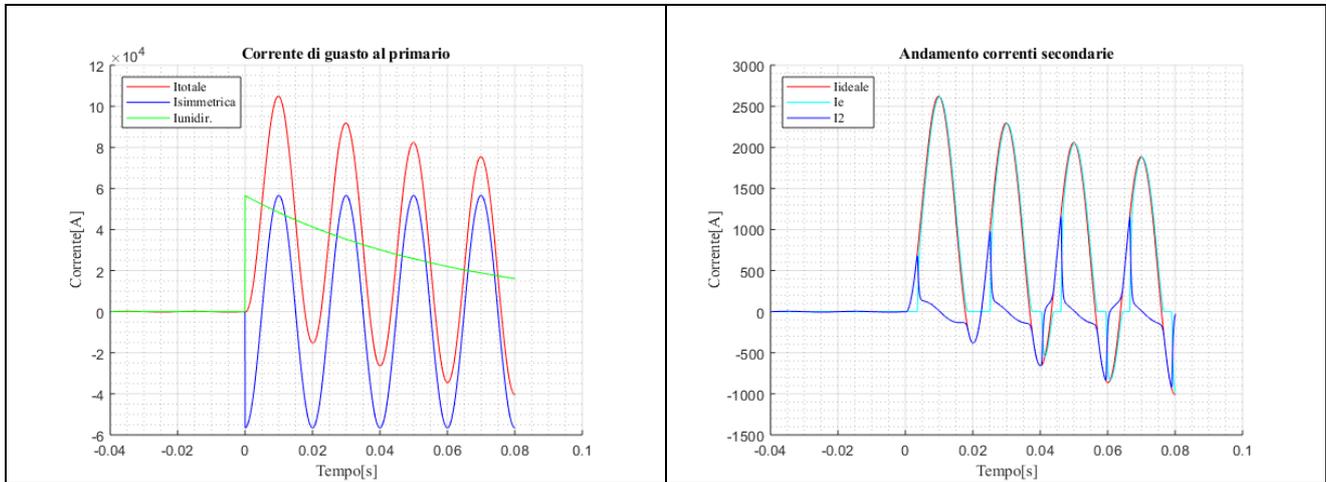


Figura 4-2 – Andamento della corrente primaria e secondaria

Dal precedente grafico della corrente secondaria I_2 appare evidente che la stessa risulta fortemente deformata a causa della saturazione del TA.

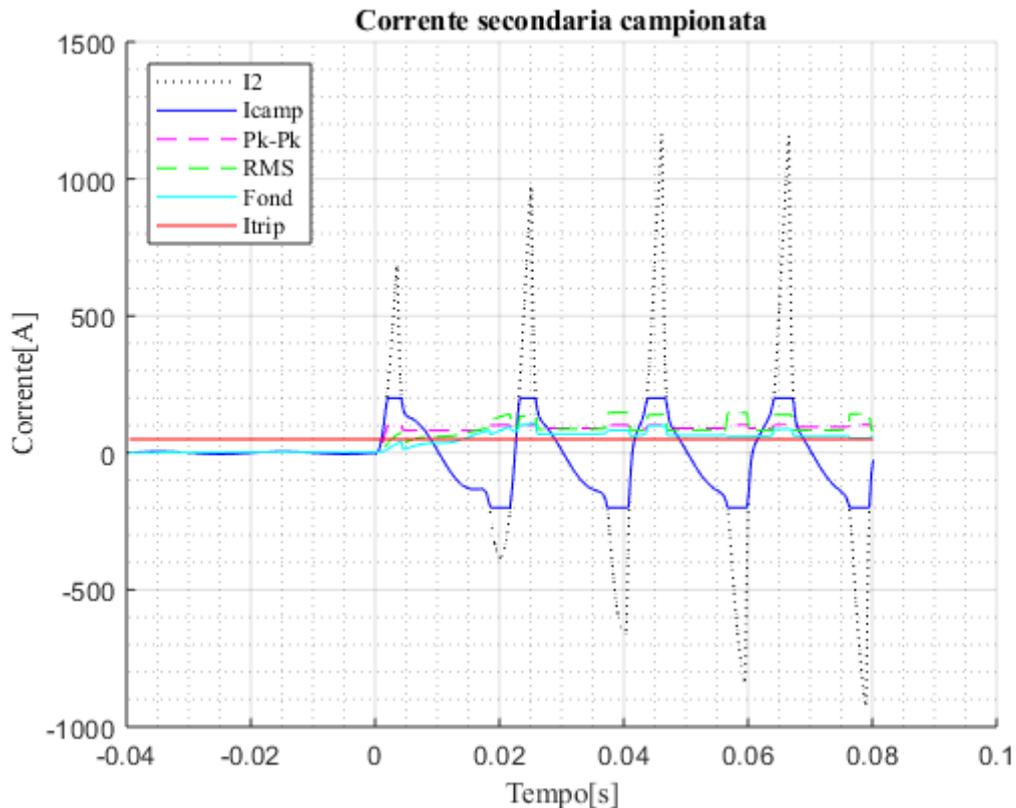
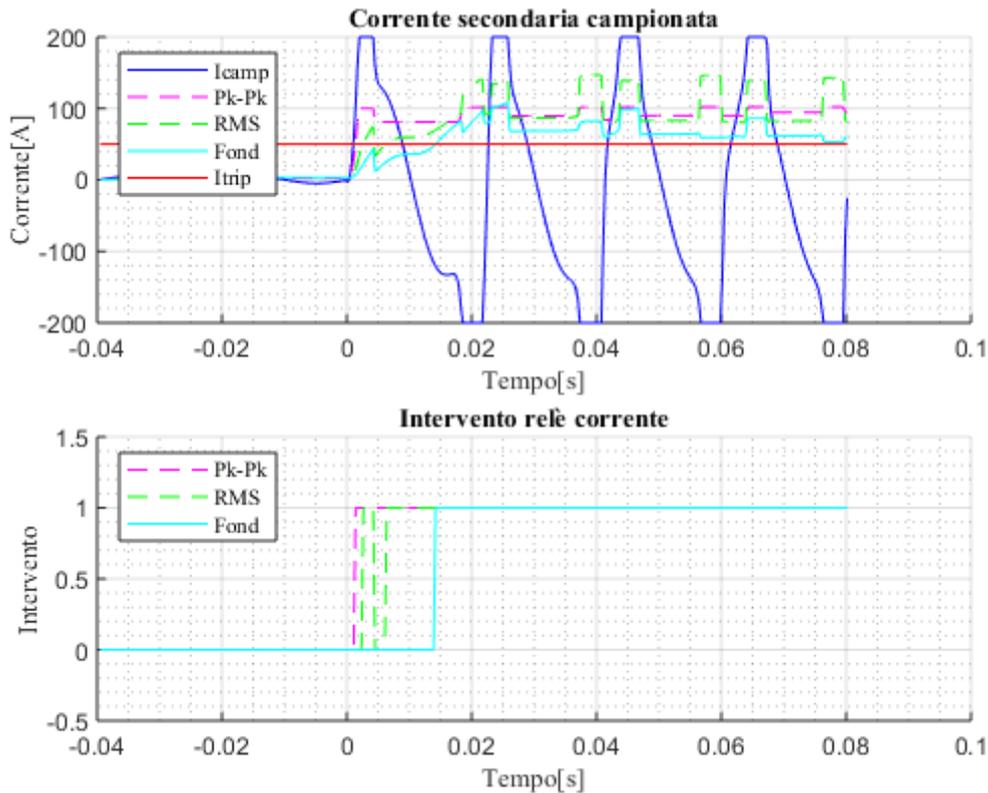


Figura 4-3 – Andamento della corrente campionata dal relè di protezione

Come altresì è evidente dalla precedente figura, anche il sistema di conversione A/D del relè di protezione lavora in zona di saturazione per correnti in valore assoluto superiori a 200 [A].



7

Figura 4-4 – Modalità di intervento del relè di protezione con TA 200/5

Dal precedente grafico risulta quindi evidente che:

- nel caso della sola rilevazione del valore efficace della fondamentale la protezione rileva il corto circuito, con ritardo inferiore al periodo (0.0142 [s]), in quanto il tempo di superamento della soglia di TRIP risulta sufficiente all'azionamento del Relè (tempo di rilevazione > di almeno 30 [ms]);
- nel caso delle rilevazione dell'RMS dell'intera corrente campionata la protezione rileva, con ritardo non significativo, il corto circuito;
- analogamente si dica per il caso di rilevazione con la tecnica Picco-Picco.

Inoltre, dalla Figura 4-3 si può dedurre che il valore di picco della I_2 (circa 1170 [A]) risulta inferiore al valore di sovraccaricabilità dinamica del relè, pari a $2.5 \cdot I_m$ (1250 [A]).

Pertanto, in questo caso, un TA con caratteristiche di prima valutazione non adeguate potrebbe risultare comunque adatto all'applicazione.

Tuttavia, in rapporto al ridotto margine funzionale, evidenziato nella precedente figura ed in considerazione della verifica negativa sulla tenuta della protezione, risulta opportuno selezionare dei TA con diverse caratteristiche, ad esempio con rapporto di trasformazione maggiore (es. 800/5).

Nel merito, si riporta nel seguito un estratto del foglio di calcolo EXCEL, con TA 800/5, per le parti relative alla verifica del TA, delle protezioni e delle connessioni.

Verifica del trasformatore amperometrico:				
		1F-c.c.	2F-c.c.	3F-c.c.
VERIFICA DEL CARICO (*)		NEGATIVA	NEGATIVA	POSITIVA
ALF'	ALF'	18.17	18.17	27.03
Massima corrente primaria tollerabile a ALF' (ALF'xI _{pr}) [A]	I _{max}	2907	2907	4325
Corrente di picco al primario [A]	I _{pk}	26	91292	105415
VERIFICA del TA alla corrente di lavoro (**)		POSITIVA	POSITIVA	POSITIVA
VERIFICA TENUTA del TA alla corrente di guasto (***)		POSITIVA	POSITIVA	POSITIVA
F.E.M. limite al secondario del TA [V]	E _{alf}	125.6	125.6	125.6
F.E.M. al secondario del TA alla corrente di guasto [V]	E _{alf'}	0.1	298.9	231.8
F.E.M. di saturazione del TA [V]	E _{sat}	82.3	82.3	82.3
CONDIZIONI DI LAVORO DEL TA (****)		NON SATURATO	SATURATO	SATURATO
Costante di tempo del sistema (L/R/ω) [s]	T _p	0.064	0.064	0.064
Stima del tempo di saturazione [s]	T _{sat}	0.000	0.066	0.061
Verifica della protezione e connessioni				
		1F-c.c.	2F-c.c.	3F-c.c.
Corrente all'ingresso della protezione (con linearità) [A]		0.1	216.5	250.0
Sovraccarico termico per I _s (I _s *k _{th}) [A]	I _m	500	500	500
Energia specifica al secondario del TA in caso di guasto [I ² t]	E ₁	0.0	3281.3	4375.0
Sovraccario transitorio ammissibile della protezione (I ² t) [A ² s]	E ₂	250000	250000	250000
Sovraccario transitorio ammissibile delle connessioni (I ² t) [A ² s]	E ₂	82656	82656	82656
VERIFICA sovraccarico della protezione e connessioni (*)		TOLLERABILE	TOLLERABILE	TOLLERABILE
VERIFICA TENUTA della protezione alla corrente di guasto (**)		POSITIVA	POSITIVA	POSITIVA

Anche il TA 800/5 risulta lavorare in zona di saturazione ma in questo caso la verifica sulla tenuta della protezione appare positiva.

In questa situazione, con il codice di calcolo MatLab si ottengono i seguenti risultati, nel caso di guasto trifase:

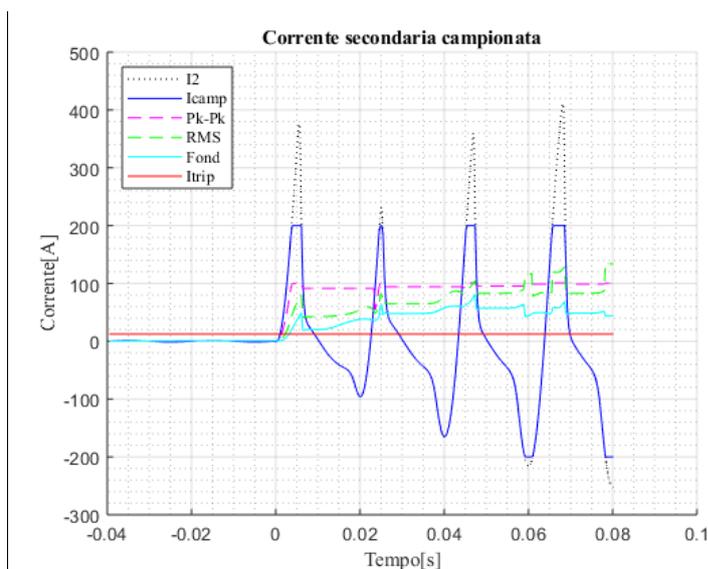


Figura 4-5 – Andamento della corrente campionata dal relè di protezione

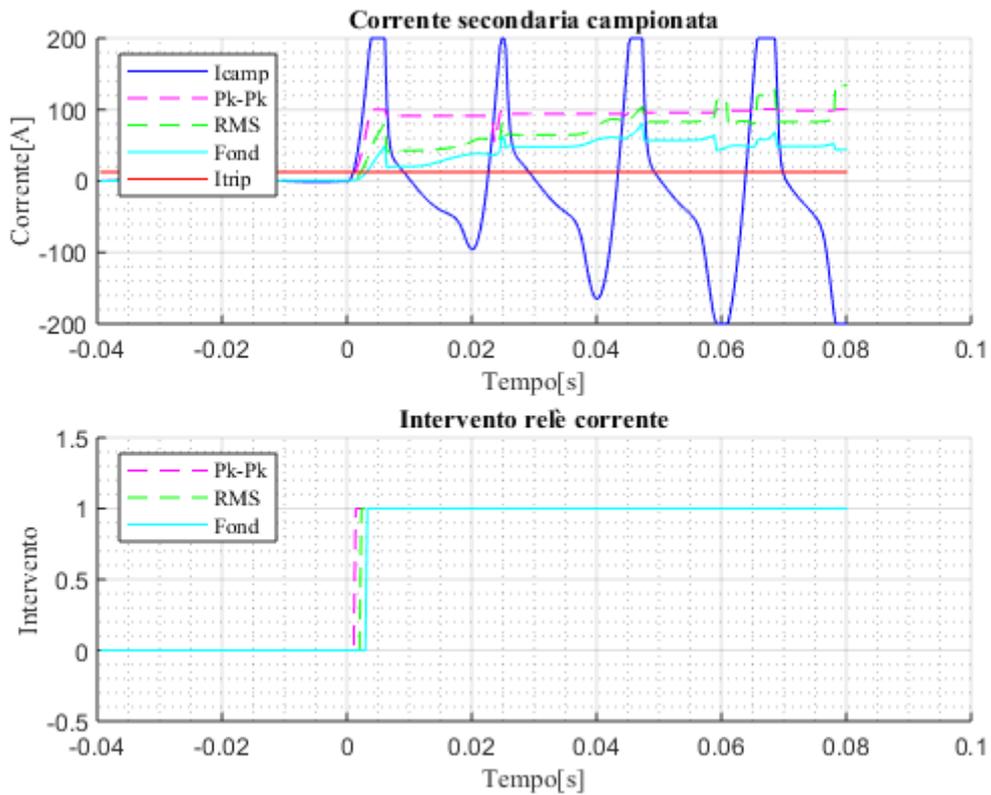


Figura 4-6 – Modalità di intervento del relè di protezione con TA 800/5

Con il filtro sul valore efficace della fondamentale la protezione permette la rilevazione del guasto, con ritardo non significativo ed il superamento della soglia di TRIP appare senza soluzione di continuità. Inoltre, dopo il primo ciclo il valore efficace della fondamentale appare decisamente superiore alla soglia di TRIP, rispetto al caso con TA 200/5.

Per completezza, nel seguito si riportano i risultati del calcolo che considerano i precedenti dati di input ma nel caso del guasto bifase.

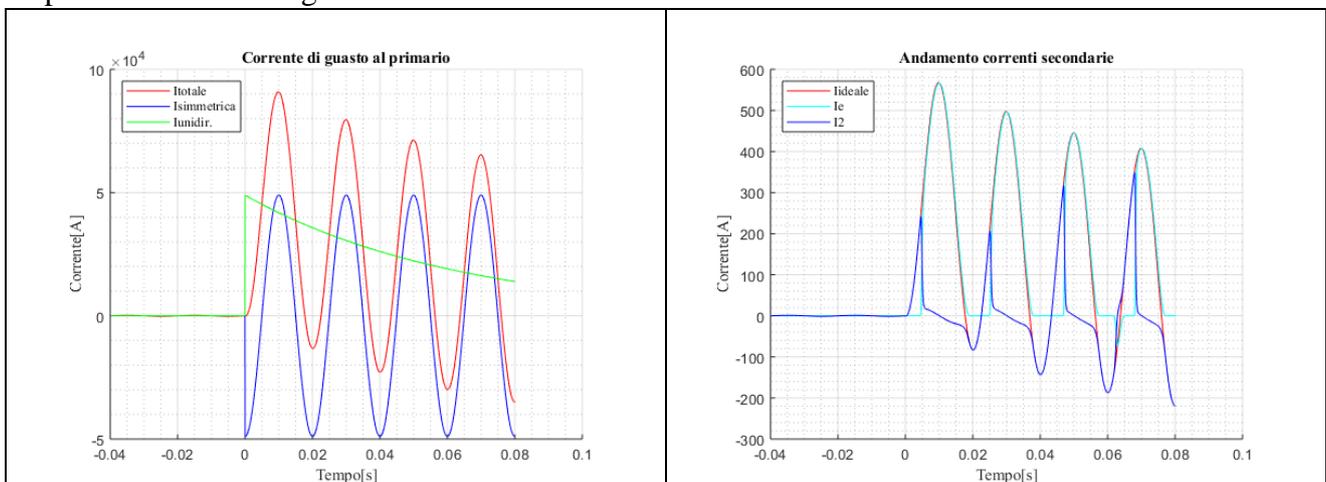


Figura 4-7 – Andamento della corrente al primario ed al secondario

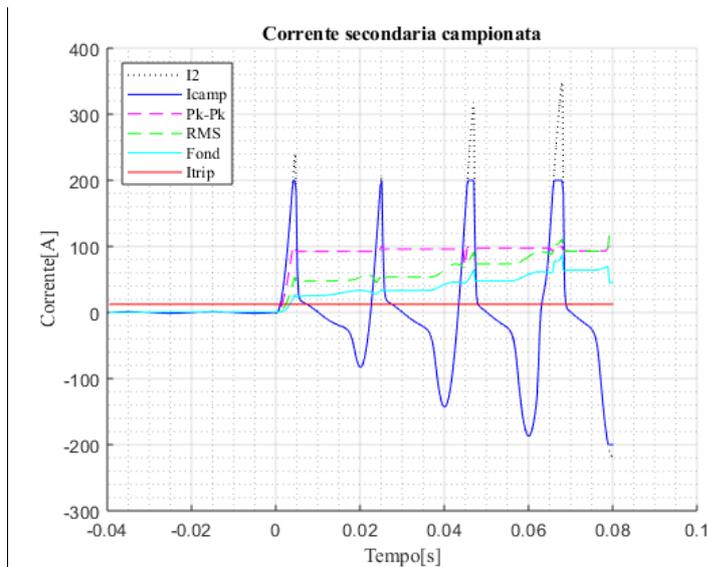


Figura 4-8 – Andamento della corrente campionata dal relè di protezione

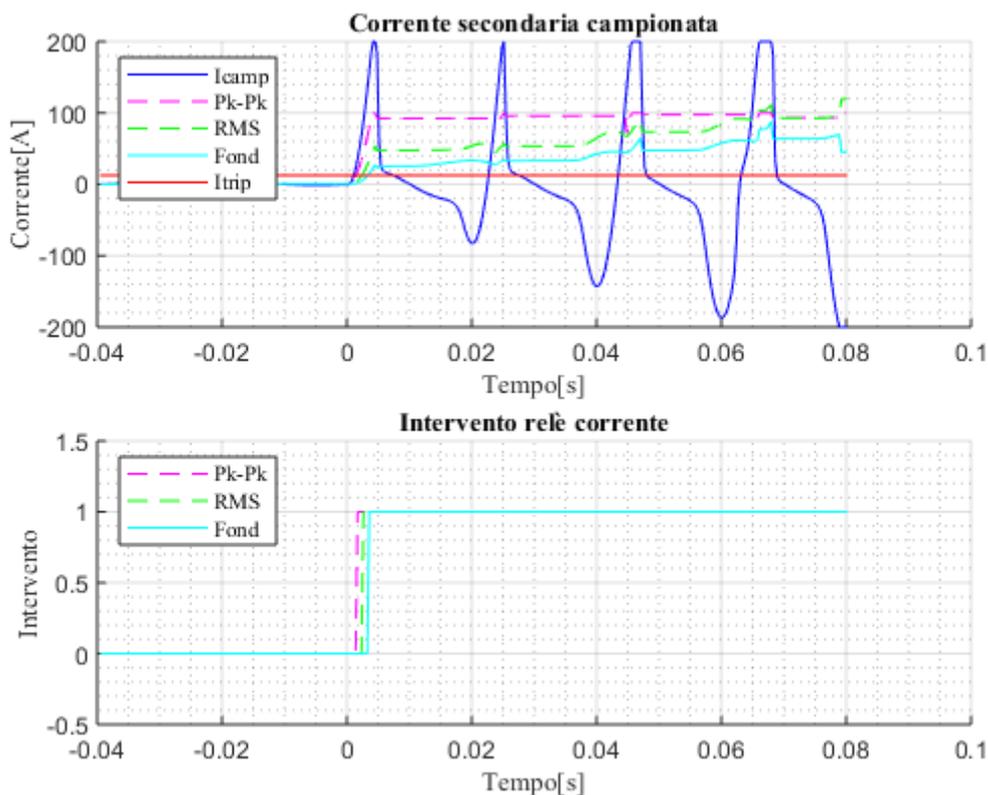


Figura 4-9 – Modalità di intervento del relè di protezione con TA 800/5

Anche nel caso del guasto bifase, sia con la sola rilevazione del valore efficace della fondamentale, sia con i filtri RMS e Picco-Picco, la protezione permette la rilevazione del guasto, con ritardo non significativo, ed il superamento della soglia di TRIP appare senza soluzione di continuità.

Pertanto, si può affermare che il complesso “Sistema di Protezione” risulta adeguato anche con il TA funzionante in zona di saturazione.

4.2 Esempio n.2

In questo esempio si consideri una centrale idroelettrica esistente alla quale sono connessi n.5 gruppi di generazione, di cui n.3 con una potenza nominale di 43.9 [MVA], n.1 da 21.25 [MVA] e n. 1 da 18.75 [MVA]. Ciascun generatore è collegato tramite una rete a 10 [kV] ad un trasformatore AT/MT. I trasformatori sono collegati ad una stazione AT 132 [kV].

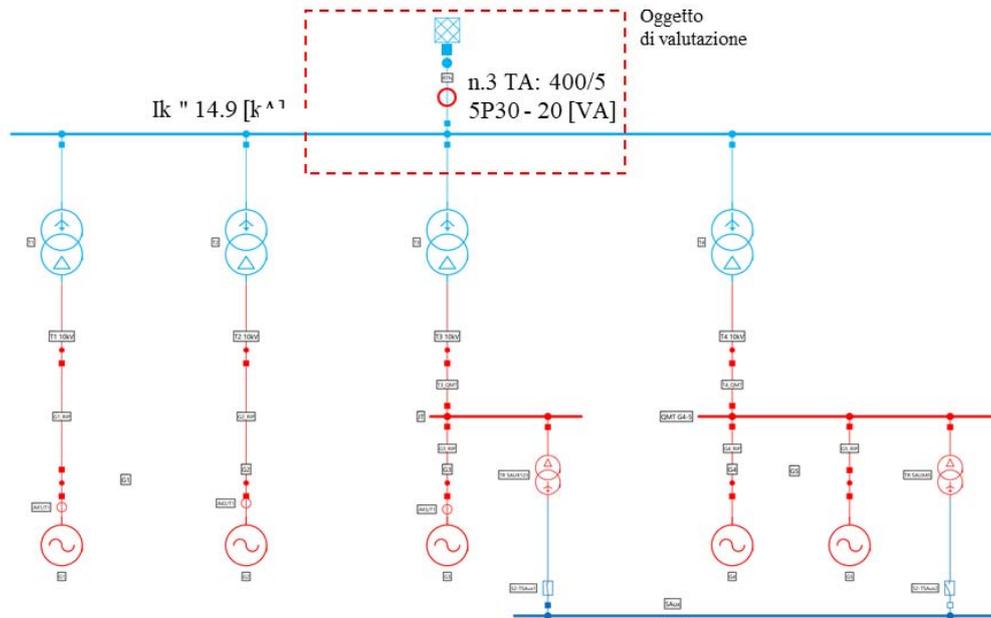


Figura 4-10 – Schema elettrico di principio della centrale idroelettrica

Oggetto di valutazione sono i TA di protezione esistenti, presenti nel punto di connessione alla rete AT, costituiti da n.3 apparati con i seguenti dati:

- I_{pr} 400 [A]
- I_{sr} 5 [A]
- VA_r 20 [VA]
- Classe di precisione 5P
- ALF 30
- S 9 (si assumono i dati dell'esempio n.2 § 2.5.3)
- E_{sat} 121.8 [V] (dal foglio di calcolo, in mancanza di dati costruttivi)

I TA sono collegati ad un relè di protezione, con VA_p (carico ingresso di corrente) di 0.1 [VA], con cavi di lunghezza di 80 m.

La soglia d'intervento del relè di protezione I_{trip} è fissata a 4 [kA], con riferimento al primario.

Si consideri quindi, nel punto di connessione con la rete AT:

- valore efficace della componente simmetrica della corrente di c.c. trifase massima di 14.9 [kA];
- rapporto X/R pari a 6.7.

Anche in questo caso, si procede alla verifica con il foglio di calcolo EXCEL per la valutazione iniziale del TA.

Dati di INPUT

Verifica TA - connessione a 132 kV				
Descrizione	Simb.	Valore		
Dati di ingresso della rete da proteggere				
Frequenza [Hz]	f	50		
Resistenza sistema [p.u.]	R	0,15		
Reattanza sistema [p.u.]	X	1		
Corrente di lavoro al primario [A]	Ip	150		
		1F-c.c.	2F-c.c.	3F-c.c.
Corrente di guasto al primario [A] (*)	Ikmax	10	12904	14900
Tempo di intervento del sistema di protezione [s] (**)	Tset	0,17	0,17	0,17
Tempo massimo tollerabile di estinzione del guasto [s] (***)	Tmax	0,2	0,2	0,2
Dati di ingresso del trasformatore amperometrico da verificare				
Corrente nominale primario Ipr [A]	Ipr	400		
Corrente nominale secondario Isr [A]	Isr	5		
Prestazione nominale [VA]	VAr	20		
Classe di precisione		5P		
ALF	ALF	30		
Corrente termica ad 1s [A]	Ith	60000		
Corrente nominale dinamica [A]	Idyn	150000		
Corrente termica nominale permanente [A]	Icth	480		
Resistenza TA [Ω] (*)	Rct	nd		
Inverso pendenza curva saturazione TA	S	9		
F.E.M. di saturazione del TA [V] (*)	Esat	nd		
Dati di ingresso protezione				
Tipologia		Protezione		
Modello		Siemens SIPROTEC 7UM85		
Carico ingresso di corrente della protezione [VA]	VAp	0,1		
Fattore di sovraccarico ammissibile (1s) dell'ingresso corrente della protezione (riferito alla Isr)	kth	100		
Campionamenti per periodo [n]	np	128		
Corrente massima campionabile (riferita a In) [A]	Iconv	500		
Corrente di intervento della protezione (rif. al primario) [A]	Itrip	4000		
Note		50-51		
Dati di ingresso cavi di collegamento				
Tratto 1 : posizione		Cavo interno		
Tratto 1 : lunghezza cavo (m)	L1	10		
Tratto 1 : sezione cavo (mm ²)	S1	2,5		
Tratto 1 : materiale conduttore		rame		
Tratto 1 : Isolamento		PVC		
Tratto 1 : coefficiente K del cavo	K1	115		
Tratto 1 : induttanza chilometrica del cavo [mH/km]		0,32	0,32	0,32
		1F-c.c.	2F-c.c.	3F-c.c.
Tratto 1 : numero conduttori		2	2	2
Tratto 2 : posizione		Cavo esterno		
Tratto 2 : lunghezza cavo (m)	L2	80		
Tratto 2 : sezione cavo (mm ²)	S2	4		
Tratto 2 : materiale conduttore		rame		
Tratto 2 : Isolamento		Gomma		
Tratto 2 : coefficiente K del cavo	K2	143		
Tratto 2 : induttanza chilometrica del cavo [mH/km]		0,46	0,46	0,46
		1F-c.c.	2F-c.c.	3F-c.c.
Tratto 2 : numero conduttori		2	2	1

Dati di CALCOLO e VERIFICHE:

Valori calcolati per il trasformatore amperometrico				
Resistenza TA [Ω] (*)	Rct	0,24		
Carico effettivo resistenza TA [VA] a Isr	VA _t	6,00		
Valori calcolati per i cavi di collegamento				
Resistività alla temperatura di esercizio °C tratto 1 [Ω/mm^2]	ρ_1	0,0213		
Resistività alla temperatura di esercizio °C tratto 2 [Ω/mm^2]	ρ_2	0,0227		
Resistenza conduttore tratto 1 [Ω/cond]		0,09		
Resistenza conduttore tratto 2 [Ω/cond]		0,45		
		1F-c.c.	2F-c.c.	3F-c.c.
Resistenza totale conduttori tratto 1 [Ω]	R _{I1}	0,17	0,17	0,17
Resistenza totale conduttori tratto 2 [Ω]	R _{I2}	0,91	0,91	0,45
Reattanza totale conduttori tratto 1 [Ω]	X _{I1}	0,00	0,00	0,00
Reattanza totale conduttori tratto 2 [Ω]	X _{I2}	0,01	0,01	0,01
Carico dei cavi a Isr - tratto 1 (VA)		4,25	4,25	4,25
Carico dei cavi a Isr - tratto 2 (VA)		22,66	22,66	11,33
Valori calcolati per il carico totale				
		1F-c.c.	2F-c.c.	3F-c.c.
Resistenza totale [Ω]	R _c	1,08	1,08	0,63
Reattanza totale [Ω]	X _c	0,01	0,01	0,01
Carico totale effettivo [VA] a Isr	VA _c	27,12	27,12	15,79
Carico totale effettivo / Carico nominale [%]		135,58%	135,58%	78,94%
Verifica del trasformatore amperometrico:				
		1F-c.c.	2F-c.c.	3F-c.c.
VERIFICA DEL CARICO (*)		NEGATIVA	NEGATIVA	POSITIVA
ALF'	ALF'	23,55	23,55	35,80
Massima corrente primaria tollerabile a ALF' (ALF' x I _{pr}) [A]	I _{max}	1884	1884	2864
Corrente di picco al primario [A]	I _{pk}	23	30017	34660
VERIFICA del TA alla corrente di lavoro (**)		POSITIVA	POSITIVA	POSITIVA
VERIFICA TENUTA del TA alla corrente di guasto (***)		POSITIVA	POSITIVA	POSITIVA
F.E.M. limite al secondario del TA [V]	E _{alf}	156,0	156,0	156,0
F.E.M. al secondario del TA alla corrente di guasto [V]	E _{alf'}	0,2	213,0	161,5
F.E.M. di saturazione del TA [V]	E _{sat}	121,8	121,8	121,8
CONDIZIONI DI LA VORO DEL TA (****)		NON SATURATO	SATURATO	SATURATO
Costante di tempo del sistema (L/R/ω) [s]	T _p	0,021	0,021	0,021
Stima del tempo di saturazione [s]	T _{sat}	0,000	0,031	0,022
Verifica della protezione e connessioni				
		1F-c.c.	2F-c.c.	3F-c.c.
Corrente all'ingresso della protezione (con linearità) [A]		0,1	161,3	186,3
Sovraccarico termico per 1s (I _s *k _{th}) [A]	I _m	500	500	500
Energia specifica al secondario del TA in caso di guasto [I ² t]	E ₁	0,0	4422,9	5897,1
Sovraccario transitorio ammissibile della protezione (I ² t) [A ² s]	E ₂	250000	250000	250000
Sovraccario transitorio ammissibile delle connessioni (I ² t) [A ² s]	E ₂	82656	82656	82656
VERIFICA sovraccarico della protezione e connessioni (*)		TOLLERABILE	TOLLERABILE	TOLLERABILE
VERIFICA TENUTA della protezione alla corrente di guasto (**)		POSITIVA	POSITIVA	POSITIVA

Dalla suddetta tabella si evince che, in queste condizioni funzionali, i TA lavorano in zona di saturazione, nel caso di guasto trifase e bifase a valle del TA stesso. Sono tuttavia ancora positive le verifiche sulla tenuta del TA e sovraccarico della protezione.

Si procede quindi con la simulazione del funzionamento del complesso TA e protezione con il codice MatLab.

Nel seguito si riportano i risultati del calcolo con il codice MatLab, nel caso del guasto trifase.

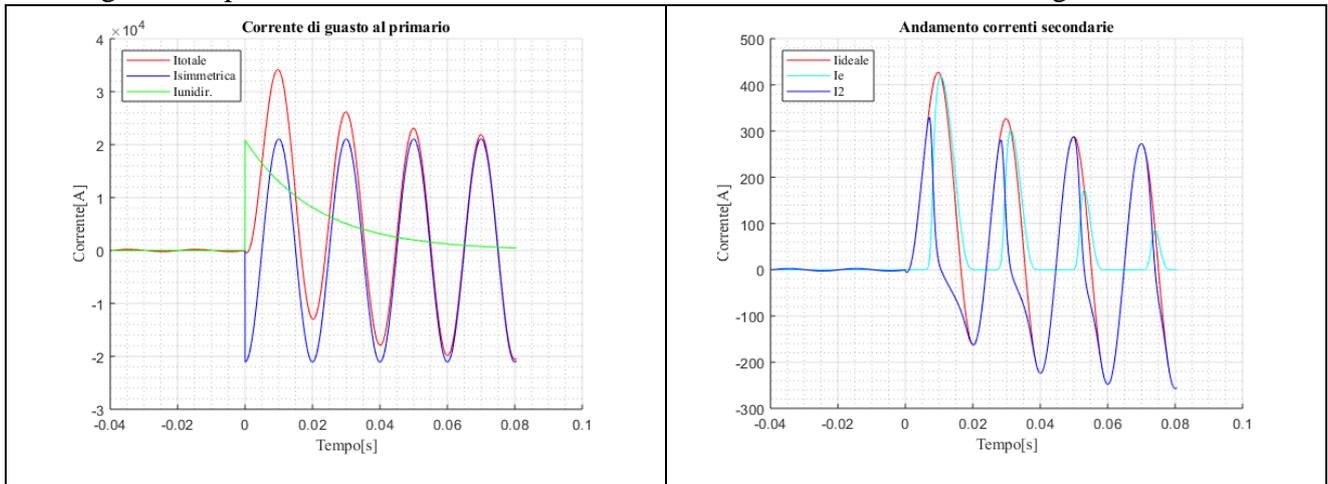


Figura 4-11 – Andamento della corrente al primario ed al secondario

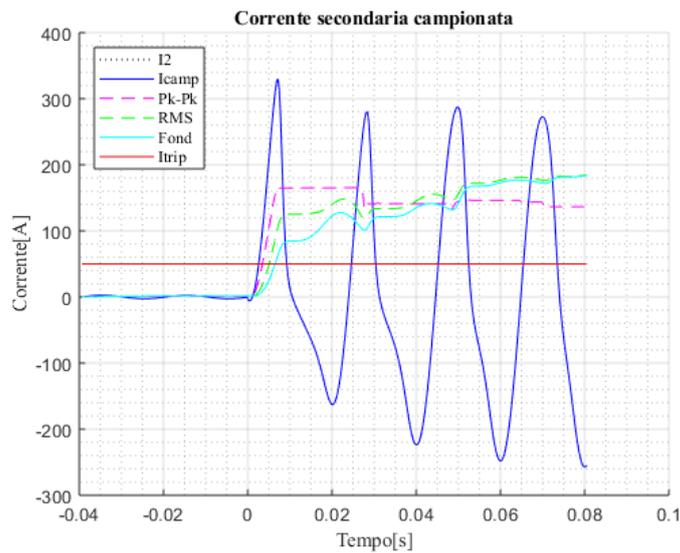


Figura 4-12 – Andamento della corrente campionata dal relè di protezione

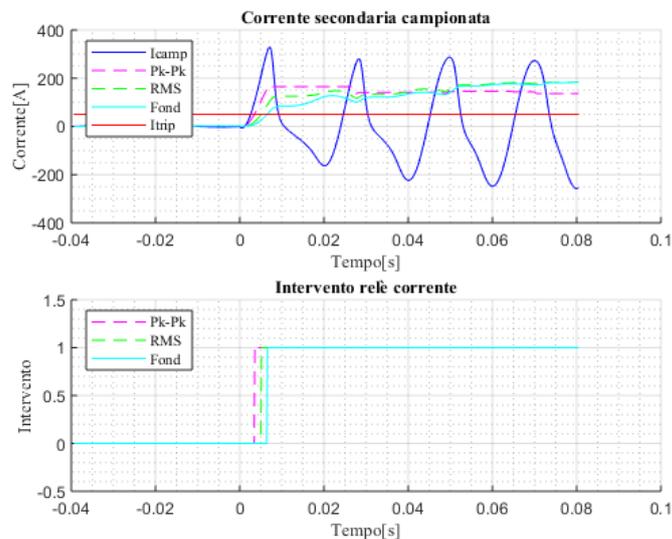


Figura 4-13 – Modalità di intervento del relè di protezione con TA 400/5

Dal precedente grafico risulta evidente che, sia con la sola rilevazione del valore efficace della fondamentale, sia con i filtri RMS e Picco-Picco, la protezione permette la rilevazione del guasto, con ritardo inferiore al periodo (nel caso peggiore 0.0066 [s]), ed il superamento della soglia di TRIP appare senza soluzione di continuità.

Per completezza, nel seguito si riportano i risultati del calcolo che considerano i precedenti dati di input, nel caso del guasto bifase.

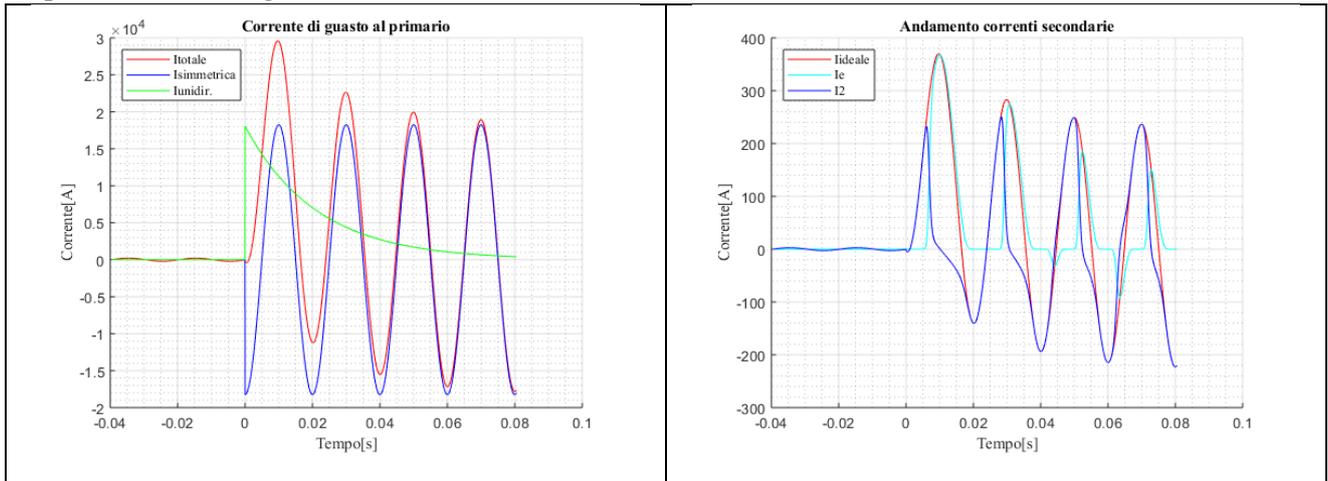


Figura 4-14 – Andamento della corrente al primario ed al secondario

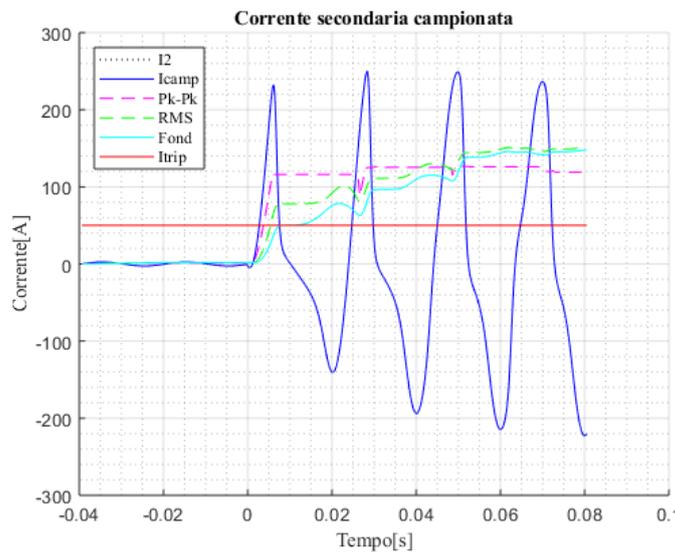


Figura 4-15 – Andamento della corrente campionata dal relè di protezione

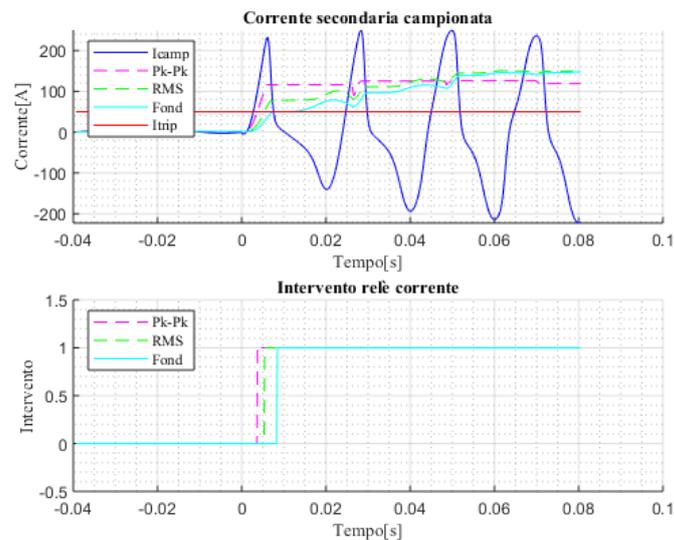


Figura 4-16 – Modalità di intervento del relè di protezione con TA 400/5

Anche nel caso del guasto bifase, risulta evidente che sia con la sola rilevazione del valore efficace della fondamentale, sia con i filtri RMS e Picco-Picco, la protezione permette la rilevazione del guasto, con ritardo inferiore al periodo (nel caso peggiore 0.0084 [s]), ed il superamento della soglia di TRIP appare anche in questo caso senza soluzione di continuità.

Pertanto, si può affermare che il complesso “Sistema di Protezione” risulta adeguato anche se il TA lavora in zona di saturazione.

Conclusioni

L'obiettivo del presente lavoro di tesi è stato lo sviluppo di un tool di verifica delle condizioni funzionali dei trasformatori amperometrici (TA) di protezione, in applicazioni AT ed MT, ai fini dell'adeguatezza del complesso TA / relè di protezione / elementi ausiliari, nonché la valutazione del comportamento complessivo del sistema con il TA in saturazione. Questa tipologia di strumenti risulta molto utile nell'ambito degli studi sui sistemi elettrici di protezione, oggetti di particolare importanza nell'attività di SINT Ingegneria Srl, società professionale nella quale è stato sviluppato questo lavoro di tesi.

Per quanto concerne le valutazioni d'adeguatezza dei TA, il primo obiettivo è stato quello di verificare se un TA di protezione, nelle condizioni d'utilizzo, risulti funzionare nella zona lineare della curva di magnetizzazione e contestualmente garantisca i seguenti punti:

- la compatibilità del TA, in termini di tensione e corrente, nel punto d'installazione, considerando le sollecitazioni dovute alle condizioni di guasto presunto;
- la compatibilità del TA con il relè di protezione, considerando le sollecitazioni dovute alle correnti al secondario del TA;
- la compatibilità del TA con i circuiti di collegamento alla protezione, sempre considerando le sollecitazioni dovute alle correnti al secondario del TA.

Il secondo obiettivo è stato quello di verificare l'adeguatezza del complesso TA di protezione (funzionante in zona di saturazione) - relè di protezione, per mezzo di uno strumento in grado di simulare sia il comportamento del trasduttore che della protezione.

Sono quindi stati sviluppati:

- uno specifico foglio di calcolo MS EXCEL per le principali valutazioni d'adeguatezza, individuate nel suddetto primo obiettivo;
- uno specifico programma MatLab, basato sul modello semplificato della curva di magnetizzazione, definito dal Power System Relaying Committee ⁽⁶⁾, per la simulazione del funzionamento del TA in zona di saturazione e del comportamento del complesso TA-protezione, come previsto nel suddetto secondo obiettivo.

Per lo sviluppo di questi applicativi sono stati prevalentemente utilizzati i contenuti delle seguenti fonti documentali: il testo "Le protezioni dei sistemi elettrici di potenza" - G. Pratesi ⁽⁴⁾; documentazioni disponibili presso SINT Ingegneria Srl, in particolare ⁽¹⁾⁽²⁾⁽⁶⁾; le definizioni della normativa CEI EN CEI EN 61869-2; le indicazioni del "Corso protezioni elettriche, Università di Padova" - Ing. Alberto Cerretti ⁽¹⁶⁾.

Tuttavia, si evidenzia che lo studio svolto risulta limitato alla valutazione di TA di classe P, PX (IEC) e di classe C (IEEE), che comunque appaiono i più utilizzati nell'ambito delle protezioni di massima corrente. Altresì, non sono state sviluppate le possibili applicazioni

relative ai TA di classe PR, TPX, TPY e TPZ (IEC) e di classe K, T, X (IEEE) nei quali risultano più complesse le fasi di studio per le specifiche applicazioni d'utilizzo, quali ad esempio l'individuazione del flusso residuo in condizioni di richiusura su guasto (nei cicli di lavoro C-O-C-O).

Inoltre, come già evidenziato al § 2.1, lo studio considera condizioni di semplificazione del circuito elettrico equivalente del TA che in alcuni casi possono non essere accettabili, come ad esempio:

- nel caso di TA di classe PR, PXR (IEC) e di classe T, X (IEEE) dove è possibile la presenza di traferro nel circuito magnetico;
- nel caso di TA con reattanza di dispersione non trascurabile;
- nel caso di TA con avvolgimenti non uniformemente distribuiti.

Altro limite dell'algoritmo di simulazione può risultare l'accuratezza del modello PRSC, che trascura il comportamento del TA nella zona lineare della curva di magnetizzazione. Questo limite risulta evidente nel caso in cui gli errori introdotti dalla modellazione semplificata, in condizioni di bassa corrente e basso carico, non risultino trascurabili (ad esempio nel caso di TA in cui la curva della zona lineare di magnetizzazione abbia una ridotta pendenza).

In questo caso sarà necessario utilizzare un modello di calcolo più elaborato e preciso. Inoltre, sempre nel modello semplificato, la valutazione della magnetizzazione residua risulta poco accurata (seppur adeguata ad un primo approccio) in quanto non considera fenomeni di isteresi. Nel caso in cui risulti necessaria una modellizzazione più accurata, avendo a disposizione i necessari dati costruttivi del TA (spesso di difficile reperimento), potrebbe risultare opportuna la modellazione con strumenti più sofisticati.

In sintesi, il codice MatLab proposto permette di valutare le funzionalità dei TA più utilizzati, nell'ambito delle protezioni di massima corrente, con un grado di accuratezza generalmente adeguato alle tipiche applicazioni di questi trasduttori.

Infine, lo stesso codice MatLab, con opportune future modifiche ed integrazioni, potrebbe consentire le seguenti ulteriori valutazioni:

- il confronto tra forme d'onda di corrente di più TA con diverso grado di saturazione, come nel caso di protezioni differenziali (ANSI 87) o nel caso d'inserzione Holmgreen;
- la possibilità di implementare qualsiasi forma d'onda della corrente di guasto al primario, non soltanto sinusoidale, quindi considerando la presenza di armoniche di corrente;
- la possibilità di implementare lo studio di TA con circuito magnetico con presenza di traferro o con reattanza di dispersione non trascurabile, quali ad esempio i TA di classe PR, PXR (IEC) o T, X (IEEE);

- la possibilità di implementare lo studio nel caso di richiusura su guasto (cicli di lavoro C-O-C-O) con TA di classe TPX, TPY, TPZ (IEC) o T, X (IEEE);
- il miglioramento della valutazione della magnetizzazione residua, considerando fenomeni di isteresi;
- il miglioramento della valutazione del tempo d'intervento, d'inerzia, di ricaduta del relè, anche considerando la tipologia funzionale del relè stesso (tempo indipendente, NI, VI, EI).

NOMENCLATURA

I principali acronimi utilizzati nel testo sono i seguenti:

AT	=	Alta Tensione
MT	=	Media Tensione
a.c.	=	corrente alternata
d.c.	=	corrente continua
CT	=	Current Transformer
DFT	=	Trasformata discreta di Fourier
TA	=	Trasformatore amperometrico
TO	=	Trasformatore amperometrico omopolare
TV	=	Trasformatore voltmetrico

Nel seguito si rappresentano le principali variabili utilizzate nel presente documento:

VARIABILI DI SISTEMA

f_r	=	Frequenza nominale [Hz]
ω	=	Pulsazione ($2\pi f$) [rad/s]
R	=	Resistenza di sistema [p.u.]
L	=	Induttanza di sistema [H]
X	=	Reattanza di sistema [p.u.]
T_p	=	Costante di tempo della componente unidirezionale della corrente di guasto $X/(\omega \cdot R)$ [s]
t	=	Valore istantaneo del tempo [s]
dt	=	Derivata del tempo [s]
T_{max}	=	Tempo massimo tollerabile di estinzione del guasto [s]
I_p	=	Corrente di lavoro al primario [A]

VARIABILI SPECIFICHE DI TRASFORMATORE AMPEROMETRICO

I_{th}	=	Corrente termica di breve durata nominale: valore efficace della corrente primaria che un TA, con avvolgimento secondario in cortocircuito, deve essere in grado di sopportare per 1 s, senza riportare danni
I_{dyn}	=	Corrente nominale dinamica: valore di picco della corrente primaria, che un TA può sopportare, con l'avvolgimento secondario in cortocircuito, senza subire danni elettrici e/o meccanici, in conseguenza delle forze elettrodinamiche
I_{cth}	=	Corrente termica nominale permanente: valore della corrente che può circolare in regime permanente nell'avvolgimento primario, con l'avvolgimento secondario

collegato alla prestazione nominale, senza che le sovratemperature superino i valori specificati

U_m	=	Tensione massima per l'apparecchiatura: tensione massima tra le fasi (valore efficace) per la quale il TA è progettato per quanto riguarda il suo isolamento
CL	=	classe di precisione
I_{pl}	=	corrente primaria limite di precisione nominale; valore della corrente primaria fino alla quale il TA rispetta le prescrizioni per l'errore composto
ε_c	=	Errore composto TA, riferito ad ALF ed I_{sr} [%]
ALF	=	(Accuracy Limit Factor) Fattore limite di precisione nominale
ALF'	=	Fattore limite di precisione effettivo.
E_k	=	Valore efficace tensione nel punto di ginocchio della curva di eccitazione [V]
E_s	=	Valore efficace tensione in uscita dal TA [V]
E_{sat}	=	Valore efficace della tensione di eccitazione corrispondente alla I_{pl} [V]
E_{ALF}	=	F.e.m. limite di precisione secondaria del TA [V]
I_e	=	Valore efficace della corrente secondaria di eccitazione [A]
I_{pr}	=	Corrente nominale primaria del TA [A]
I_{sr}	=	Corrente nominale secondaria del TA [A]
I_s	=	Valore efficace della corrente secondaria [A]
I_2	=	Valore efficace della corrente del carico alimentato dal TA [A]
k_r	=	Rapporto di trasformazione nominale del TA
R_{ct}	=	Resistenza dell'avvolgimento secondario del TA a 75°C [Ω]
R_b	=	Prestazione resistiva nominale del TA (VA_r/I_{sr}^2) [Ω]
VA_r	=	Prestazione nominale del TA [VA]
S	=	Inverso pendenza curva di magnetizzazione nella zona di saturazione
λ o Φ	=	Flusso di magnetizzazione [Wb]
λ_{rem}	=	Flusso residuo [p.u.]
T_{sat}	=	Stima del tempo di saturazione del TA [s]
X_m	=	Reattanza di magnetizzazione [Ω]

VARIABILI SPECIFICHE PER RELÈ DI PROTEZIONE ED AUSILIARI

DT	=	Definite Time (caratteristica d'intervento a tempo indipendente)
IT	=	Inverse Time (caratteristica d'intervento a tempo dipendente)
I_n	=	Corrente nominale del relè (1, 2, 5 [A])
I_{conv}	=	Corrente massima campionabile dal convertitore A/D [A], con riferimento alla I_n
I_{kmax}	=	Valore efficace della componente simmetrica della corrente massima di cortocircuito al primario [A]

I_{trip}	=	Soglia di intervento amperometrica della protezione, riferito alla corrente primaria [A]
k_{th}	=	Fattore di sovraccarico ammissibile per 1s, dell'ingresso di corrente della protezione (riferito a I_{sr})
np	=	Campionamenti per periodo
T_{set}	=	Tempo di estinzione del guasto [s]
R_p	=	Resistenza d'ingresso del relè di protezione [Ω]
VA_p	=	Carico ingresso di corrente del relè di protezione [VA]
R_l	=	Resistenza conduttore di collegamento tra TA e relè di protezione [Ω]
X_l	=	Reattanza conduttore di collegamento tra TA e relè di protezione [Ω]
R_{ba}	=	Prestazione resistiva applicata al TA (resistenza carico $R_l + R_p$) [Ω]
R_t	=	Prestazione resistiva totale (resistenza $R_{ba} + R_{ct}$) [Ω]
L_b	=	Induttanza del carico [H]
X_b	=	Reattanza del carico, alla frequenza nominale [Ω]
Z_b	=	Impedenza del carico [Ω]
PF	=	Fattore di potenza del carico
RP	=	Rapporto tra valore efficace e di picco di I_e

Riferimenti bibliografici

1. S. E. Zocholl, Schweitzer Engineering Laboratories, Inc., Pullman, WA USA, D. W. Smaha, Southern Company Services, Inc., Birmingham, AL USA – 1992 – “*Current transformer concepts*”
2. John Horak, Basler Electric Company, James Hrabliuk, NxtPhase – “*Current Transformer Errors and Transformer Inrush as Measured by Magnetic, Optical and Other Unconventional CTs*”
3. Gabriel Benmouyal, Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. Longueuil, Québec, CANADA, Stanley E. Zocholl, Schweitzer Engineering Laboratories, Inc., Holland, PA USA – “*The impact of high fault current and CT rating limits on overcurrent protection*”
4. G. Pratesi – “*Le protezioni dei sistemi elettrici di potenza, Milano*”: Hoepli, 2005.
5. Zhihan Xu (GE Digital Energy), Matt Proctor (GE Digital Energy) Ilia Voloh (GE Digital Energy), Mike Lara (SNC-Lavalin) – 2015 – “*Evaluation of CT Saturation Impact for Various 87L Applications*”
6. Working Group Report of the IEEE Power System Relaying Committee- “*Theory for CT SAT Calculator*, http://www.pes-psrc.org/Reports/CT_SAT%2010-01-03.zip”, 2003.
7. IEEE C57.13 – “*Requirements for Instrument Transformers*”, IEEE Standard, June 1993.
8. IEEE C37.110 - 2007 – “*Guide for the Application of Current Transformers Used for Protective Relaying Purposes*”, April 2008.
9. IEEE C37.2: “*Electrical Power System Device Function Numbers, Acronyms, and Contact Designations*”
10. IEEE Std. 100: “*The Authoritative Dictionary of IEEE Standards Terms*”, IEEE 2000
11. CEI EN 61869-1: “*Trasformatori di misura - Prescrizioni generali*” - 2010
12. CEI EN 61869-2: “*Trasformatori di misura - Parte 2: Prescrizioni aggiuntive per trasformatori di corrente*” – 2014
13. IEC 60255-4: “*Single input energizing quantity measuring relays with dependent specified time*”
14. IEC 60909-0: “*Short-circuit currents in three-phase a.c. systems - Part 0: Calculation of currents*”
15. Thytronic – AN010 “*Guida per la scelta delle caratteristiche dei TA per le protezioni Thytronic linea PRO N e Smart line*” – 2011
16. Ing. Alberto Cerretti - Corso protezioni elettriche, Università di Padova, 17-04-2012 “*Sistemi di protezione di reti elettriche trifasi in corrente alternata*”
17. Documento TERNA - “*Valori minimi e massimi convenzionali della corrente di cortocircuito e della potenza di cortocircuito della rete rilevante con tensione 380-220-150-132 kV - Anno 2018*”

Appendice 1 - Codice MATLAB

```

% Codice di calcolo TA-PROTEZIONE - in saturazione
clear all
clc
% DATI DI INPUT versione MATLAB

dati = readtable('foglio di
calcolo.xlsx','Sheet','DATI','Range','B1:B26');
datil = table2array(dati);

f=datil(1,1); %frequenza sistema
camp=datil(2,1); % punti curve corrente / flusso da selezionare come
potenze di 2
camp2=datil(3,1); % punti campionati da selezionare come potenze di 2
cicli=datil(4,1);
Ikmax=datil(5,1); % componente simmetrica della corrente guasto primario
tguast=datil(6,1); % tempo di guasto
Imconv=datil(7,1); % corrente massima del convertitore A/D dalla
protezione
ALF=datil(8,1); % Prestazione TA ..P(ALF)
S=datil(9,1); % inverso inclinazione curva saturazione
Ir=datil(10,1); % corrente di linea al primario
Ipr=datil(11,1); % corrente nominale primario
Isr=datil(12,1); % corrente nominale secondario
VAr=datil(13,1); % prestazione nominale (VA)
CE=datil(14,1); %errore limite di precisione (%)
Rl=datil(15,1); % resistenza cavi
Xl=datil(16,1); % reattanza cavi
Rr=datil(17,1); % resistenza protezione
Lr=datil(18,1); % induttanza protezione
alfa0=datil(19,1); % sfasamento componente simmetrica
L=datil(20,1); % induttanza sistema
R=datil(21,1); % resistenza sistema
Fini=datil(22,1); % flusso iniziale
Esat=datil(23,1); %tensione ad Is
Itripp=datil(24,1)/Ipr*Isr; % corrente di TRIP della protezione
Rct=datil(25,1); % resistenza TA

puls=2*pi*f; %pulsazione
rcamp=camp/camp2;
fc=camp*f; % frequenza definizione curve
nn=1/f*cicli*fc; % punti totali
nn2=nn/rcamp; % punti totali campionamento protezione
dt=1/fc;

Rcn=VAr/((Isr)^2); % Resistenza nominale (VAn/(In2)^2
Xr=Lr*puls; % reattanza protezione
Rb=Rl+Rr; % resistenza cavi + carico
Xb=Xl+Xr; % reattanza cavi + carico
Ie=Isr*ALF*CE/100; % corrente di eccitazione a Vs
Itrip(1:nn2)=Itripp; % vettore corrente di TRIP della protezione
kt=L/R; % costate di tempo sistema
Fsat=sqrt(2)*Esat/puls; %flusso saturazione
alfal=atan(L*puls/R); % sfasamento componente simmetrica di guasto

% calcolo RP - integrazione con metodo numerico

```

```

for k=1:1:fc
    RP1(k)=(sin(k*2*pi/fc))^(2*S);
end
RP=sqrt(mean(RP1));

% calcolo A
A=(Isr*ALF*CE/100*(puls^S))/(((Esat*sqrt(2))^S)*RP);

% calcolo correnti e flusso
for k=1:1:nn
    temp=k*dt;
    if temp<tguast
        Itot(k)=sqrt(2)*Ir*sin(puls*temp-alfa0);
        dir=sqrt(2)*Ir*(Isr/Ipr)*puls*(cos(puls*temp-alfa0));
    else
        Isim(k)=sqrt(2)*Ikmax*sin(puls*temp-alfal); % componente
simmetrica al primario
        Iexp(k)=sqrt(2)*Ikmax*sin(alfal)*exp((-temp+tguast)/kt); %
componente unidirezionale al primario
        Itot(k)=Isim(k)+Iexp(k); % corrente totale al primario
        dir=sqrt(2)*Ikmax*(Isr/Ipr)*(-sin(alfal))/kt*exp((-
temp+tguast)/kt)+puls*(cos(puls*temp-alfal)); % derivata della corrente
    end
    Isec(k)=Itot(k)*(Isr/Ipr); % corrente totale al secondario
    xtemp(k)=k*dt-tguast;

    % calcolo fusso
    if k==1
        Flux(k)=Fini; % flusso iniziale
    else
        Flux(k)=Flux(k-1)+dFlux(k-1); % flusso incrementale
    end

    Iecc(k)=sign(Flux(k))*A*abs(Flux(k))^S; % corrente di eccitazione
    dFlux(k)=(Rb*(Isec(k)-
Iecc(k))+Xb/puls*dir)*dt/(1+Xb/puls*A*S*(abs(Flux(k))^(S-1))); % gradiente
del flusso

    % calcolo I verso il relè
    I2(k)=Isec(k)-Iecc(k);

    % calcolo tensione TA
    Ve(k)=I2(k)*sqrt(Rb^2+Xb^2);

end

% campionamento protezione
Irms=0;
I2c=0;
kk=1;
xx=1;
Tpeaka=0;
Tfft3a=0;
Tfft4a=0;

%CAMPIONAMENTO
for n=1:1:nn2
    %Finestra di campionamento
    for i=1:1:camp2

```

```

    if (n+i-camp2)<1
        I2c(kk)=0;
    else
        if I2((n+i-camp2)*rcamp)<=Imconv && I2((n+i-camp2)*rcamp)>=-
Imconv
            I2c(kk)=I2((n+i-camp2)*rcamp);
        elseif I2(n*rcamp)> Imconv
            I2c(kk)=Imconv;
        elseif I2(n*rcamp)< -Imconv
            I2c(kk)=-Imconv;
        end
    end
    kk=kk+1;
end

%Forma d'onda convertita con limiti convertitore A/D
if I2(n*rcamp)<=Imconv && I2(n*rcamp)>=-Imconv
    I2camp(n)=I2(n*rcamp);
elseif I2(n*rcamp)> Imconv
    I2camp(n)=Imconv;
elseif I2(n*rcamp)< -Imconv
    I2camp(n)=-Imconv;
end

%Costruzione asse dei tempi
xtemp1(n)=n*dt*rcamp-tguast;

%Picco/picco del campione
Imaxs=max(abs(I2c));
Imins=min(abs(I2c));
Ipeak(n)=(Imaxs+Imins)/2;

%FFT del campione
Ifft1=fft(I2c,camp2)/camp2;

%FFT - valore efficace di tutte le componenti
Ifft2=0;
for tt=1:camp2
    Ifft2=Ifft2+(abs(Ifft1(tt)))^2;
end
Ifft3(n)=sqrt(Ifft2);

%FFT - valore efficace della sola componente fondamentale
Ifft4(n)=sqrt(2*(abs(Ifft1(2)))^2);

%Tempo d'intervento PK-PK
if Ipeak(n)>Itrip(n)
    Tpeak(n)=1;
    if Tpeaka<1
        Tpeaka=n;
    end
else
    Tpeak(n)=0;
end

%Tempo d'intervento con RMS
if Ifft3(n)>Itrip(n)
    Tfft3(n)=1;
    if Tfft3a<1
        Tfft3a=n;
    end
end

```

```

        end
    else
        Tfft3(n)=0;
    end
    %Tempo d'intervento con componente fondamentale
    if Ifft4(n)>Itrip(n)
        Tfft4(n)=1;
        if Tfft4a<1
            Tfft4a=n;
        end
    else
        Tfft4(n)=0;
    end

    I2c=0;
    kk=1;
end

%Ritardo intervento della protezione caso PK-PK
Ttotpk=Tpeaka*dt*rcamp-tguast
%Ritardo intervento della protezione caso RMS
Ttotf3=Tfft3a*dt*rcamp-tguast
%Ritardo intervento della protezione caso componente fondamentale
Ttotf4=Tfft4a*dt*rcamp-tguast

template = getprinttemplate(gcf);
setprinttemplate(gcf,template);
set(gca,'fontsize',10);

% flusso TA
figure(1);
hold on;
grid on;
grid minor;
plot(xtemp,Flux,'r'); % linea rossa
title('Andamento del Flusso di magnetizzazione','Fontname','Times New Roman');
set(xlabel('Tempo[s]'),'Fontname','Times New Roman');
set(ylabel('Flusso[Wb]'),'Fontname','Times New Roman');
print('-dtiff','figure1','-r0');
%savefig('figure1.fig');
hold off;

% Tensione secondario
figure(2);
hold on;
grid on;
grid minor;
plot(xtemp,Ve,'g'); % linea rossa
title('Andamento della Tensione al secondario Es','Fontname','Times New Roman');
set(xlabel('Tempo[s]'),'Fontname','Times New Roman');
set(ylabel('Tensione[V]'),'Fontname','Times New Roman');
print('-dtiff','figure2','-r0');
%savefig('figure2.fig');
hold off;

% Correnti guasto secondarie
figure(3);

```

```

hold on;
grid on;
grid minor;
plot(xtemp,Itot,'r'); % linea rossa
plot(xtemp,Isim,'b'); % linea blu
plot(xtemp,Iexp,'g'); % linea verde
title('Corrente di guasto al primario','Fontname','Times New Roman');
set(xlabel('Tempo[s]'),'Fontname','Times New Roman','Fontname','Times New
Roman');
set(ylabel('Corrente[A]'),'Fontname','Times New Roman');
legend({'Itotale','Isimmetrica','Iunidir.'},'Fontname','Times New
Roman','Location','northwest');
print ('-dtiff','figure3', '-r0');
%savefig('figure3.fig');
hold off;

% Correnti secondarie
figure(4);
hold on;
grid on;
grid minor;
plot(xtemp,Isec,'r'); % linea rossa
plot(xtemp,Iecc,'c');
plot(xtemp,I2,'b'); % linea blu
title('Andamento correnti secondarie','Fontname','Times New Roman');
set(xlabel('Tempo[s]'),'Fontname','Times New Roman');
set(ylabel('Corrente[A]'),'Fontname','Times New Roman');
legend({'Iideale','Ie','I2'},'Fontname','Times New
Roman','Location','northwest');
print ('-dtiff','figure4', '-r0');
%savefig('figure4.fig');
hold off;

%campionamento della protezione
figure(5);
subplot(2,1,1);
hold on;
grid on;
grid minor;
plot(xtemp1,I2camp,'b'); % linea blu
plot(xtemp1,Ipeak,'m--'); % linea
plot(xtemp1,Ifft3,'g--'); % linea
plot(xtemp1,Ifft4,'c'); % linea
plot(xtemp1,Itrip,'r');
title('Corrente secondaria campionata','Fontname','Times New Roman');
set(xlabel('Tempo[s]'),'Fontname','Times New Roman');
set(ylabel('Corrente[A]'),'Fontname','Times New Roman');
legend({'Icamp','Pk-Pk','RMS','Fond','Itrip'},'Fontname','Times New
Roman','Location','northwest');
hold off;

subplot(2,1,2);
hold on;
grid on;
grid minor;
plot(xtemp1,Tpeak,'m--'); % linea
plot(xtemp1,Tfft3,'g--'); % linea
plot(xtemp1,Tfft4,'c'); % linea
title('Intervento relè corrente','Fontname','Times New Roman')
ylim([-0.5,1.5]);

```

```
set(xlabel('Tempo[s]'),'Fontname','Times New Roman')
set(ylabel('Intervento'),'Fontname','Times New Roman')
text(1,1,'prova');
legend({'Pk-Pk','RMS','Fond'},'Fontname','Times New
Roman','Location','northwest');
print ('-dtiff','figure5','-r0');
%savefig('figure5.fig');
hold off;

%campionamento della protezione
figure(6);
hold on;
grid on;
grid minor;
plot(xtemp,I2,'k:'); % linea blu
plot(xtemp1,I2camp,'b'); % linea blu
plot(xtemp1,Ipeak,'m--'); % linea
plot(xtemp1,Ifft3,'g--'); % linea
plot(xtemp1,Ifft4,'c'); % linea
plot(xtemp1,Itrip,'r');
title('Corrente secondaria campionata','Fontname','Times New Roman');
set(xlabel('Tempo[s]'),'Fontname','Times New Roman');
set(ylabel('Corrente[A]'),'Fontname','Times New Roman');
legend({'I2','Icamp','Pk-Pk','RMS','Fond','Itrip'},'Fontname','Times New
Roman','Location','northwest');
print ('-dtiff','figure6','-r0');
%savefig('figure6.fig');
hold off;

close(gcf);
```