

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA – FACOLTA' DI INGEGNERIA

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA ELETTRONICA

TESI DI LAUREA

MANOVRE SUI TRASFORMATORI A VUOTO IN MT

SWITCHING ON NO LOAD MV TRANSFORMERS

RELATORE: GOBBO RENATO

LAUREANDO: JIGAILO ANDREI

ANNO ACCADEMICO: 2011

INDICE

LISTA DELLE FIGURE	iv
LISTA DELLE TABELLE	v
LISTA DELLE EQUAZIONI.....	v
SOMMARIO.....	1
1. INTRODUZIONE	1
2. DIVERSI TIPI DI SOVRATENSIONI DI MANOVRA.....	2
2.1 PREACCENSIONI	2
2.2 IL TRONCAMENTO NORMALE DELLA CORRENTE.....	2
2.3 RIACCENSIONI MULTIPLE ED AUMENTO DELLA TENSIONE	4
2.4 IL TRONCAMENTO VIRTUALE DELLA CORRENTE	5
2.5 RISONANZA.....	6
3. INFLUENZA DELL'INTERRUTTORE A VUOTO SUI PARAMETRI DELLE SOVRATENSIONI GENERATE DURANTE LE MANOVRE.....	6
3.1 INTRODUZIONE.....	6
3.2 PROPRIETA' DIELETTRICHE DEL VUOTO.....	7
3.3 PRINCIPI GENERALI D'INTERRUZIONE.....	10
3.4 IL FENOMENO DELLA SOVRATENSIONE.....	11
4. INTERAZIONE TRA LE FASI.....	14
4.1 TRONCAMENTO DELLA CORRENTE INDOTTA	15
4.2 RIACCENSIONI INDOTTE	15
4.3 SOVRATENSIONI INDOTTE DOVUTE A MANOVRE SULLE ALTRE FASI.....	15
5. DETERMINAZIONE DELLE TENSIONI TRANSITORIE	15
6. ANALISI DELLA DISTRIBUZIONE DELLA TENSIONE NEGLI AVVOLGIMENTI DI UN TRASFORMATORE IN MT DURANTE LA PREACCENSIONE IN UN INTERRUTTORE	17
6.1 INTRODUZIONE.....	17
6.2 DESCRIZIONE DEL TRASFORMATORE	18
6.3 RAPPRESENTAZIONE DEL TRASFORMATORE	19
6.4 MODELLO DEL TRASFORMATORE.....	20
6.5 DESCRIZIONE DEL TEST ED I RISULTATI	23
6.6 CONCLUSIONI.....	27
7. EQUAZIONI FONDAMENTALI PER LO STUDIO DEI TRANSITORI IN TRASFORMATORE TRIFASE	28

7.1	INTRODUZIONE	28
7.2	TRASFORMATORE A TRE COLONNE.....	28
7.2.1	MODELLO DEL NUCLEO	30
7.2.2	EFFETTO DELL'ASIMMETRIA DEL NUCLEO	31
7.3	EQUAZIONI DIFFERENZIALI - TRONCAMENTO SIMULTANEO DELLE CORRENTI MAGNETIZZANTI.....	33
8.	POSSIBILI PRECAUZIONI CONTRO LE SOVRATENSIONI	34
8.1	INTRODUZIONE.....	34
8.2	MANOVRE CONTROLLATE.....	37
8.3	POLO AD APERTURA AVANZATA	37
8.4	L'ERRORE OPERATIVO DEL INTERRUTTORE CONTROLLATO	39
8.5	UNA NUOVA SOLUZIONE CONTRO LE TENSIONI TRANSITORIE VELOCI.....	41
9.	CONSIDERAZIONI TECNICO-ECONOMICI.....	42
10.	ALCUNI MALINTESI GENERALI	42
11.	CONCLUSIONI.....	42

LISTA DELLE FIGURE

FIGURA 2-2-1 MECCANISMO DELLA CORRENTE TRONCATA: (A) CIRCUITO MONOFASE; (B) LA CORRENTE NELL'INTERRUTTORE A VUOTO; (C) LA TENSIONE AI TERMINALI DEL CARICO DELL'INTERRUTTORE; (D) LA TENSIONE TRA I CONTATTI	3
FIGURA 2-3-1 MECCANISMI DELLE RIACCENSIONI MULTIPLE E DELL'AUMENTO DELLA TENSIONE	4
FIGURA 2-4-1 CIRCUITO DIMOSTRATIVO DI COME LA CORRENTE AD ALTA FREQUENZA RISULTANTE DA UNA RIACCENSIONE, O PREACCENSIONE IN UNA FASE PRODUCE CORRENTI AD ALTA FREQUENZA NELLE ALTRE DUE FASI	6
FIGURA 3.1-1 EVOLUZIONE IN EUROPA DEL MERCATO DEGLI INTERRUTTORI IN MT	6
FIGURA 3-2-1 CURVE DI PASCHEN PER ALCUNI GAS	7
FIGURA 3-2-2 ANDAMENTO QUALITATIVO DELLA CURVA DI PASCHEN ALLE BASSE PRESSIONI	8
FIGURA 3-2-3 EFFETTO DEL MATERIALE DEGLI ELETTRODI SULLA TENSIONE DI SCARICA IN CAMPO UNIFORME.....	9
FIGURA 3-2-4 EFFETTO DEL CONDIZIONAMENTO SULLA TENSIONE DI SCARICA	10
FIGURA 3-4-1 SOVRATENSIONI NEL CASO D'INTERRUZIONE IDEALE.....	11
FIGURA 3-4-2 SOVRATENSIONI ASSOCIATE ALL'INTERRUZIONE DI UN CIRCUITO CON TRONCAMENTO DELLA CORRENTE	12
FIGURA 3-4-3 SUCCESSIONE DI ACCENSIONI MULTIPLE ASSOCIATE ALLE ONDE DI TENSIONE CON AMPLITUDINI VARIABILI	13
FIGURA 3-4-4 ACCENSIONI MULTIPLE DURANTE LA SEPARAZIONE DEI CONTATTI E L'INTERRUZIONE DI PICCOLE CORRENTI INDUTTIVE.....	14
FIGURA 5-1 LA RELAZIONE INGRESSO-PROGRAMMA-USCITA	16
FIGURA 5-2 PROBABILITÀ CUMULATIVA DELLA CORRENTE TRONCATA IN UN INTERRUTTORE A VUOTO.....	17
FIGURA 5-3 PROBABILITÀ CUMULATIVA DELLA TENSIONE DI ROTTURA ALLA FREQUENZA NORMALE DELL'INTERRUTTORE A VUOTO.....	17
FIGURA 5-4 PROBABILITÀ CUMULATIVA DELLA TENSIONE DI ROTTURA AD ALTA FREQUENZA	17
FIGURA 6-2-1 IL TRASFORMATORE SUL QUALE SONO STATI ESEGUITI I TEST.....	18
FIGURA 6-3-1 TRASFORMATORE FATTO DA CAPACITÀ ED INDUTTANZE	19
FIGURE 6-3-2 SEMPLIFICAZIONE DI UNA SEZIONE DEL TRASFORMATORE	19
FIGURA 6-3-3 MODELLO FINALE DEL TRASFORMATORE	20
FIGURA 6-4-1 CIRCUITO EQUIVALENTE DI UN AVVOLGIMENTO DEL TRASFORMATORE	21
FIGURA 6-4-2 LE TENSIONI CALCOLATE DEL MODELLO	22
FIGURA 6-4-3 SOLUZIONE ACCURATA ANALITICA DEL PROBLEMA	22
FIGURA 6-5-1 IL CIRCUITO CON IL QUALE È STATO ESEGUITO IL TEST SUL TRASFORMATORE DI PROVA	23
FIGURA 6-5-2 LA TENSIONE MISURATA E CALCOLATA NELLA FASE B DEL TRASFORMATORE CON TENSIONE APPLICATA DA 6 kV E LA CORRENTE MISURATA NELL'INTERRUTTORE	24
FIGURA 6-5-3 LA TENSIONE MISURATA E CALCOLATA IN SPECIFICHE SPIRE NELLA FASE B DURANTE L'ALIMENTAZIONE DEL TRASFORMATORE CON TENSIONE APPLICATA DA 6 kV	25
FIGURA 6-5-4 TENSIONI MISURATE E CALCOLATE NELLA FASE B DURANTE L'ALIMENTAZIONE DEL TRASFORMATORE CON UNA TENSIONE APPLICATA DI 8 kV (FIGURA IN ALTO); ZONA 1, I PRIMI 30 MS (FIGURA IN MEZZO); ZONA 2, 40 - 70 MS (FIGURA IN BASSO).....	26
FIGURA 6-5-5 TENSIONI MISURATE E CALCOLATE NELLA FASE B (FIGURA IN ALTO); SCALA TEMPORALE INCREMENTATA (FIGURA IN MEZZO); LA TENSIONE DI ALIMENTAZIONE È DI 8 kV.....	27
FIGURA 7-2-1 CONNESSIONE A TRIANGOLO DI UN TRASFORMATORE.....	29
FIGURA 7-2-2 TRASFORMATORE A TRE COLONNE.....	30
FIGURA 7-2-2-1 CURVE ϕ -I.....	31

FIGURA 7-2-3-1 L'ANDAMENTO DELL'INDUZIONE B IN FUNZIONE DELLA CORRENTE I NELLE TRE COLONNE PER $\alpha=1/2$	32
FIGURA 7-2-3-2 LE CORRENTI MAGNETIZZANTI DI UN TRASFORMATORE A 4,16 kV, 1000 kVA	32
FIGURA 7-3-1 MODELLO DEL TRASFORMATORE A TRE COLONNE	33
FIGURA 8-1-1 EFFETTI DEL CIRCUITO RC SULLA CORRENTE	35
FIGURA 8-1-2 SOPPRESSORE ZORC	36
FIGURA 8-2-1 PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO DI UN INTERRUOTORE TRIFASE CON POLO AD APERTURA AVANZATA	38
FIGURA 8-2-2-1 L'ANDAMENTO DELLA TEMPERATURA AMBIENTE DURANTE LE OPERAZIONI DI CHIUSURA/APERTURA DELL'INTERRUPTORE CONTROLLATO	39
FIGURA 8-2-2-2 VARIAZIONE DEL TEMPO DI CHIUSURA E DEVIAZIONE DAL VALORE DI RIFERIMENTO	40
FIGURA 8-2-2-3 VARIAZIONE DEL TEMPO DI APERTURA E DEVIAZIONE DAL VALORE DI RIFERIMENTO	40
FIGURA 8-3-1 L'USO DELLA BOBINA D'ARRESTO RL PER LA PROTEZIONE DI UN TRASFORMATORE	41

LISTA DELLE TABELLE

TABELLA 1 VALORI MEDI DELLA CORRENTE TRONCATA PER ALCUNI MATERIALI	12
TABELLA 2 CARATTERISTICHE DELLE SOVRATENSIONI ASSOCIATE AL FENOMENO DELLE ACCENSIONI MULTIPLE	13
TABELLA 3 DATI DEL TRASFORMATORE	18
TABELLA 4 SOMMARIO DEL VALORE DELL'ENERGIA DISSIPATA DAGLI SCARICATORI	36

LISTA DELLE EQUAZIONI

$I_C \sqrt{\frac{(1-\gamma)L_B}{C_S}}$	2
$E_C = I_C \sqrt{\frac{L_B}{C_S}} \sin \Omega_0 T + E_0 \cos \Omega_0 T$	2
$E_C = (I^2 \frac{L_B}{C_S} + E_0^2)^{1/2}$	3
$V_S = E_M \sqrt{D}$	8
$I_E = \frac{AE^2}{\Phi} \text{EXP} \left(-\frac{B\Phi^{1.5}}{E} \right)$	9
$\frac{1}{2} LI_A^2 = \frac{1}{2} CV^2$	11
$Z = \left(j\Omega + \sqrt{\frac{2\Omega}{\Sigma M_0 D^2}} \right) L$	19
$Y = (j\Omega + \Omega \tan \Delta) C$	19
$\frac{dV_I(x)}{dx} = \sum_{j=1}^N \int_0^{\lambda_j} Z_{ij}(x, B) I_j(B)$	20
$\frac{dI_I(x)}{dx} = \sum_{j=1}^N \int_0^{\lambda_j} Y_{ij}(x, B) V_j(B)$	20
$\begin{bmatrix} I_B \\ V' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_B \\ V' \end{bmatrix}$	20
$V' = (1-D)^{-1} CV_B$	20
$V_1 = V_A - V_B, V_2 = V_B - V_C, V_3 = V_C - V_A$	28

$(I_A - C \frac{dV_A}{dt}) + (I_3 + \frac{v_3}{R}) - (I_1 + \frac{v_1}{R}) = 0$	28
$(I_B - C \frac{dV_B}{dt}) + (I_1 + \frac{v_1}{R}) - (I_2 + \frac{v_2}{R}) = 0$	28
$(I_C - C \frac{dV_C}{dt}) + (I_2 + \frac{v_2}{R}) - (I_3 + \frac{v_3}{R}) = 0$	28
$R = \frac{N^2 A}{AL}$	28
$\frac{CN^2 A}{3L} B_1'' + AB_1' + \frac{B_1}{M_1} = \frac{N}{3L} (3I_0 + I_A - I_B)$	29
$3I_0 = I_1 + I_2 + I_3$	29
$R_K = \frac{L}{M_K A}$	30
$R_2 = \frac{AL}{M_2 A}$	30
$\begin{bmatrix} \Phi_1 \\ \Phi_2 \\ \Phi_3 \end{bmatrix} = \frac{N}{S} \begin{bmatrix} R_{23} & -R_3 & -R_2 \\ -R_3 & R_{31} & -R_1 \\ -R_2 & -R_1 & R_{12} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix}$	30
$S = R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_3 R_1 + \frac{R_1 R_2 R_3}{R_0}$	31
$R_{ij} = R_i + R_j + \frac{R_i R_j}{R_0}$	31
$R_1 = R_3 = R = \frac{N^2 A}{AL}$	31
$R_2 = \frac{R}{A}$	31
$(I_A - C \frac{dV_A}{dt}) + (I_3 + \frac{v_3}{R_3}) - (I_1 + \frac{v_1}{R_1}) = 0$	33
$(I_B - C \frac{dV_B}{dt}) + (I_1 + \frac{v_1}{R_1}) - (I_2 + \frac{v_2}{R_2}) = 0$	34
$(I_C - C \frac{dV_C}{dt}) + (I_2 + \frac{v_2}{R_2}) - (I_3 + \frac{v_3}{R_3}) = 0$	34
$I_K = \frac{A}{N} (R_0 B_0 + R_K B_K)$	34
$B_0 = B_1 + B_2 + B_3$	34
$\frac{CN^2 A}{3L} \begin{pmatrix} B_1'' \\ B_2'' \\ B_3'' \end{pmatrix} + A \begin{pmatrix} B_1' \\ B_2' \\ B_3' \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} B_1/M_1 \\ B_2/M_2 \\ B_3/M_3 \end{pmatrix} + (1-A) \left\{ \frac{A}{3} B_2' \begin{pmatrix} 1 \\ -2 \\ 1 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 0 \\ B_2/M_2 \\ 0 \end{pmatrix} \right\} + \frac{A}{L} R_0 B_0 \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} = \frac{N}{3L} \begin{pmatrix} 3I_0 + I_A - I_B \\ 3I_0 + I_B - I_C \\ 3I_0 + I_C - I_A \end{pmatrix}$	34

SOMMARIO

Negli ultimi anni molti guasti insoliti sono stati segnalati nei sistemi di distribuzione in media tensione. Alcuni trasformatori convenzionali a secco e a olio erano chiaramente stati esposti a un tipo specifico di sovratensione. Durante indagini approfondite di laboratorio e di fabbrica, non sono stati trovati difetti di progettazione o di fabbricazione. I vari test di laboratorio eseguiti inizialmente sui trasformatori in AT, più tardi sui trasformatori di distribuzione in MT, per studiare il comportamento ad alta frequenza degli avvolgimenti, hanno dimostrato che le manovre di apertura/chiusura degli interruttori quando i trasformatori sono leggermente caricati oppure a vuoto, possono dar luogo a sovratensioni. Si era generalmente accettato che la causa del guasto sia la risonanza interna degli avvolgimenti. Le prove a impulso confermano i modelli di risonanza alle frequenze naturali. In questo documento descrivo il problema tipico delle sovratensioni sui trasformatori a vuoto in MT, alcuni esperimenti eseguiti da diversi gruppi di lavoro per studiare il fenomeno, le cause e le misure da implementare per proteggere i trasformatori.

1. INTRODUZIONE

Negli ultimi anni, alcuni guasti notevoli avvennero in trasformatori di distribuzione a secco e in olio, in particolare nelle reti di media tensione tra l'11 e 33 kV. Tutti questi guasti avevano caratteristiche comuni e si sono verificati in circostanze simili. Le prime indagini sui trasformatori hanno dimostrato che i guasti si sono verificati dove non erano prevedibili. I trasformatori sono stati generalmente fatti funzionare a livelli di carico basso e i cedimenti dell'isolamento avvenivano quando il livello del carico era molto basso, e quando non sono state eseguite manovre di commutazione o verificate sovratensioni di natura atmosferica. Il cedimento dell'isolamento avveniva di solito dopo uno a tre anni di funzionamento. In un caso particolare un gran numero di trasformatori di distribuzione identici a olio hanno subito un guasto analogo all'isolamento interno su due posizioni simmetriche all'interno degli avvolgimenti. Quando i trasformatori sono stati sostituiti da trasformatori identici, presto si guastarono di nuovo. Tuttavia, indagini approfondite sugli impianti di produzione non hanno mostrato alcuna ragione per sospettare inaffidabilità dei materiali o la qualità di produzione, o la progettazione errata. Al contrario: trasformatori identici, realizzati nello stesso periodo, anche installati nei sistemi stessi, ma in altri luoghi, non hanno mostrato alcun problema. Ulteriori indagini di laboratorio hanno mostrato che nessuna delle insolite distribuzioni di tensione sono state generate durante i test standard. Prove di impulso, con onda intera o troncata, hanno dimostrato che il grado di isolamento dei trasformatori è stato più che sufficiente per rispettare gli standard attuali. D'altra parte, ulteriori misurazioni hanno mostrato che vi erano sovratensioni maggiori per alcune frequenze e forme d'onda non convenzionali, cioè onde con fronte corto o onde sinusoidali ad alta frequenza. Le sovratensioni di manovra sono spesso associate agli interruttori a vuoto. Questa reputazione è dovuta alla prima generazione di interruttori a vuoto con contatti in rame puro. I fenomeni base che danno luogo a queste sovratensioni sono il troncamento normale della corrente, il troncamento virtuale della corrente, le riaccensioni multiple, le preaccensioni e la risonanza.

2. DIVERSI TIPI DI SOVRATENSIONI DI MANOVRA

2.1 PREACCENSIONI

Quando gli interruttori stanno chiudendo, la preaccensione è inevitabile, non importa quale tipo d'interruttore sia utilizzato. Una parte della tensione risultante va come un impulso nella direzione del carico. E' plausibile che l'80% della tensione risultante va nella direzione del carico, a seconda della sorgente di tensione e dell'impedenza del carico. Al suo arrivo, quando l'impedenza primariamente alta prevale, l'onda viene riflessa e si verifica un'ulteriore incremento della tensione. Valori pratici di questo effetto incrementale sono di 1.5 a 1.8 *p.u.* (parti per unità). Il salto di tensione dovuto alla preaccensione del primo polo è al massimo 1 *p.u.* Come risultato dell'oscillazione dopo l'accensione del primo polo e della tensione sul lato sorgente di -0.5 *p.u.*, un salto di 2.5 *p.u.* è possibile sugli altri due poli, quando sono chiusi.

La sovratensione massima che può essere raggiunta sui terminali di un carico induttivo ammonta quindi a $0.8 \times 1.8 \times 2.5 = 3.6$ *p.u.*

Il tempo del fronte di salita della sovratensione, che può essere 0.2 a 1 μs , è il fattore determinante delle condizioni severe a cui sono sottoposti i primi avvolgimenti. Quando, per esempio, il tempo di salita è di 1 μs , da 60 a 80% della tensione risultante è presente sui primi avvolgimenti. I fenomeni appena menzionati avvengono quando il tempo necessario per un'onda di attraversare lungo il cavo è maggiore del tempo di incremento dell'onda.

2.2 IL TRONCAMENTO NORMALE DELLA CORRENTE

Il troncamento della corrente è l'interruzione prematura della corrente alla frequenza di rete prima che passi per lo zero naturale dovuta all'instabilità della piccola corrente d'arco nell'interruttore a vuoto. La corrente nell'interruttore a vuoto può essere interrotta quasi istantaneamente (frazioni di microsecondo), invece la corrente nel carico induttivo non può annullarsi istantaneamente.

L'energia $\frac{1}{2} Li^2$ presente in quel momento nel carico induttivo oscillerà attraverso la sempre presente capacità parassita (nei cavi tale capacità è maggiore rispetto ai conduttori in aria), e la sovratensione ammonterà a

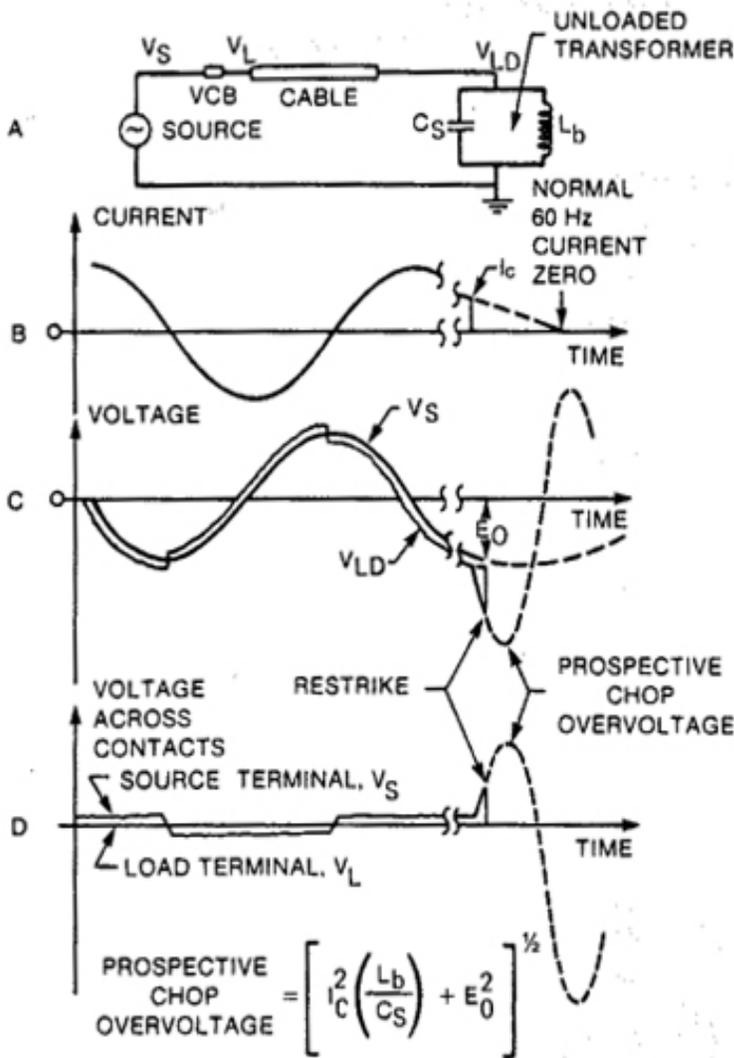
$$I_C \sqrt{\frac{(1 - \gamma)L_b}{C_s}} \quad (1)$$

I_C è il livello della corrente troncata, $\sqrt{\frac{L_b}{C_s}}$ è l'impedenza caratteristica del carico, γ rappresenta le perdite del circuito, specialmente le perdite nel ferro.

Quando la corrente viene troncata dal livello I_C , la tensione tra i terminali del carico e la terra, E_C è data da

$$E_C = I_C \sqrt{\frac{L_b}{C_s}} \sin \omega_0 t + E_0 \cos \omega_0 t \quad (2)$$

Figura 2-2-1 Meccanismo della corrente troncata: (A) Circuito monofase; (B) La corrente nell'interruttore a vuoto; (C) La tensione ai terminali del carico dell'interruttore; (D) La tensione tra i contatti



dove L_b è l'induttanza effettiva del carico, C_s è la capacità effettiva carico-terra, E_0 il valore istantaneo della tensione sul carico alla frequenza di rete nel momento in cui la corrente viene troncata e ω_0 è la pulsazione naturale del carico.

Il valore di picco della tensione sul trasformatore è dato da

$$E_c = \left(I_c^2 \frac{L_b}{C_s} + E_0^2 \right)^{1/2} \quad (3)$$

Questa è l'ampiezza massima teorica della sovratensione lungo il carico e la terra dovuta al troncamento della corrente, trascurando le perdite e l'attenuazione della tensione sul carico dovuta alla riaccensione nell'interruttore. Considerando che l'impedenza caratteristica di un trasformatore a vuoto è elevata e l'ampiezza della corrente magnetizzante è molto bassa, l'interruttore a vuoto interrompe la corrente non appena i contatti si separano. La sovratensione che appare nel GAP (spazio interelettrodico) è spesso sufficiente per causare riaccensioni nell'interruttore a vuoto e questa tensione viene limitata da successive riaccensioni. Si può vedere

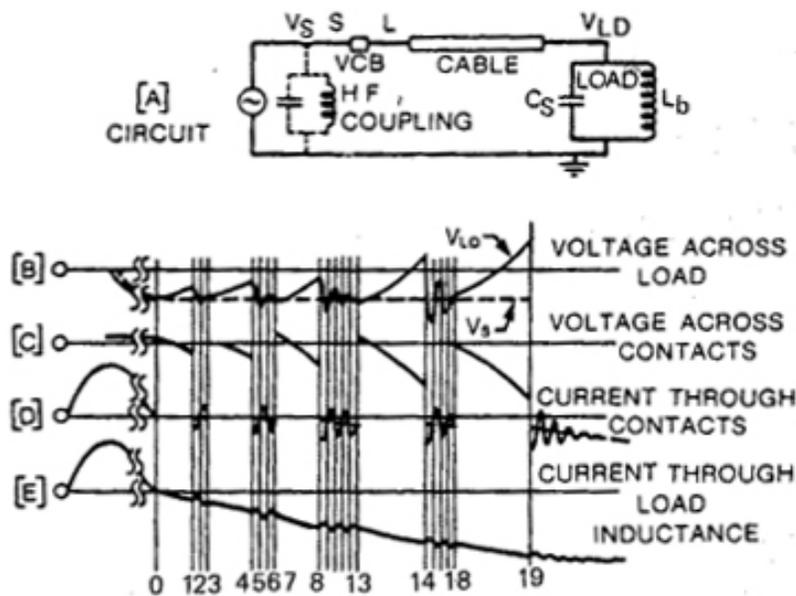
nella Figura 2-2-1 (C e D) quanto detto. Un altro fattore importante che limita le sovratensioni dovute al troncamento della corrente è il fattore γ , cioè le perdite del circuito, che sono principalmente le perdite nel ferro e l'energia immagazzinata nell'induttanza non disponibile per alimentare la sovratensione. Durante le manovre su un trasformatore a vuoto, l'induttanza magnetizzante effettiva è inversamente proporzionale alla percentuale di corrente magnetizzante. Quando la corrente magnetizzante è minore della corrente troncata da un interruttore a vuoto, le sovratensioni sono proporzionali alla radice quadrata della corrente magnetizzante. In pratica, trasformatori con correnti magnetizzanti minori producono sovratensioni minori.

La gamma in frequenza delle sovratensioni è fino a 20 kHz. Con il troncamento di correnti fino al massimo 6 A, le sovratensioni sono limitate, in pratica, a 3 o 4 p.u.

2.3 RIACCENSIONI MULTIPLE ED AUMENTO DELLA TENSIONE

In linea di principio, le riaccensioni multiple possono verificarsi sia durante le operazioni di chiusura e apertura. Un interruttore con il dielettrico con tempo di ripristino molto veloce come il vuoto o l'SF₆, può interrompere la corrente istantanea dopo una preaccensione quando si chiude l'interruttore. Perché i contatti continuano a muoversi un verso l'altro, la successiva preaccensione avviene quando una piccola tensione prevale sul gap (la tensione tra i contatti). Quando si apre l'interruttore, la tensione transitoria di ripristino *TTR* (*TRV* – transient recovery voltage) può superare la rigidità dielettrica, in modo che la riaccensione accade. Questo sarà principalmente il caso in cui la separazione dei contatti avviene intorno allo zero naturale della corrente in un circuito induttivo serie. La corrente può essere interrotta di nuovo, quando raggiunge frequenze elevate, da interruttori con un dielettrico ripristinante veloce. A causa della grande distanza fra i contatti che nel frattempo è sorta, la riaccensione avverrà quando tensioni più elevate compaiono tra i contatti, dopo di che una nuova interruzione può avvenire. Questo fenomeno si può ripetere più volte. Come risultato delle riaccensioni multiple, la frequenza della corrente può aumentare ulteriormente. Quando l'interruzione avviene ad alta frequenza, questa corrente istantanea sarà troncata a valori relativamente elevati. Le sovratensioni risultanti possono essere superiori rispetto al troncamento normale della corrente. La frequenza di ripetizione delle riaccensioni è compresa tra 25 e 250 kHz. La gamma in frequenza della *TTR*, quando la sovratensione avviene, è fino a 20 kHz. La riaccensione come la preaccensione causa sovratensioni, dove la prima può dar luogo a sovratensioni fino a 17 p.u.

Figura 2-3-1 Meccanismi delle riaccensioni multiple e dell'aumento della tensione



La sequenza di successive riaccensioni ed interruzione di correnti ad alta frequenza portano all'incremento dell'energia nell'induttanza effettiva del carico combinato coll'incremento del GAP, permettono successive riaccensioni a tensioni più elevate. Data la natura probabilistica di questo fenomeno, non è detto che le successive riaccensioni avverano a tensioni più elevate. Nella Figura 2-3-1 è illustrato quanto detto sopra.

Le riaccensioni multiple o l'aumento della tensione possono essere o un fenomeno monofase o trifase.

2.4 IL TRONCAMENTO VIRTUALE DELLA CORRENTE

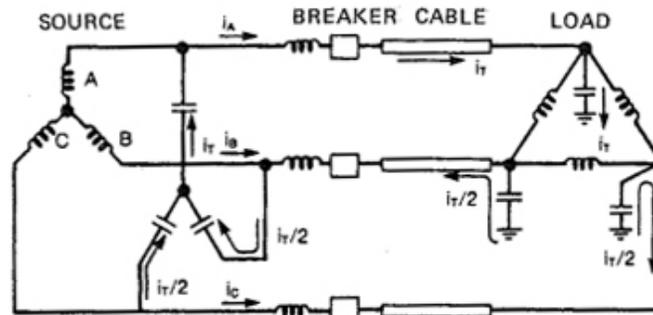
Se una riaccensione in una fase (diciamo la fase A) provoca la circolazione di correnti ad alta frequenza nelle altre due fasi, può accadere il troncamento virtuale della corrente. La corrente ad alta frequenza nella fase A, i_T , dovuta alla riaccensione nella fase considerata, fluisce verso terra attraverso la capacità parassita e il carico. Se il sistema trifase è simmetrico, la corrente i_T , si divide in parti uguali $i_T/2$ nelle fasi B e C. Le correnti $i_T/2$ nelle fasi B e C, ritornano nella fase A attraverso le capacità parassite sul lato della sorgente dell'interruttore. Le correnti ad alta frequenza nelle fasi B e C, sono della stessa polarità e ampiezza, ma sono di polarità inversa rispetto alla corrente i_T nella fase A.

Un interruttore con il dielettrico ripristinante veloce può interrompere bruscamente le fasi considerate a causa dell'elevata frequenza delle correnti, le correnti forzate a zero non coincidono temporalmente. Questo fenomeno è chiamato "troncamento virtuale della corrente". In più le correnti nelle fasi B e C si avvicinano a zero da polarità opposte, quindi le tensioni transitorie risultanti nelle fasi B e C sono di polarità inversa. Conseguentemente, le sovratensioni tra le fasi B e C sono doppie rispetto alle sovratensioni nelle fasi considerate e la terra.

Il valore delle correnti troncate può essere maggiore che nel caso delle riaccensioni multiple o di troncamento normale della corrente e quindi le sovratensioni saranno maggiori. Le sovratensioni in teoria possono superare 40 p.u.

Nella Figura 2-4-1 è indicato un esempio di quanto detto.

Figura 2-4-1 Circuito dimostrativo di come la corrente ad alta frequenza risultante da una riaccensione, o preaccensione in una fase produce correnti ad alta frequenza nelle altre due fasi



2.5 RISONANZA

La frequenza di risonanza di trasformatori con piccoli rapporti come ad esempio 10/2 kV e 10/6 kV, può essere presente nella stessa area della frequenza di ripetizione delle riaccensioni multiple (25 – 250 kHz). Con questi trasformatori, le sovratensioni che possono accadere sul lato secondario sono 3 – 5 volte le sovratensioni sul lato primario. Con trasformatori con il rapporto più elevato, ad esempio 10/0.4 kV, nessun danno a causa della risonanza può accadere in pratica.

3. INFLUENZA DELL'INTERRUTTORE A VUOTO SUI PARAMETRI DELLE SOVRATENSIONI GENERATE DURANTE LE MANOVRE

3.1 INTRODUZIONE

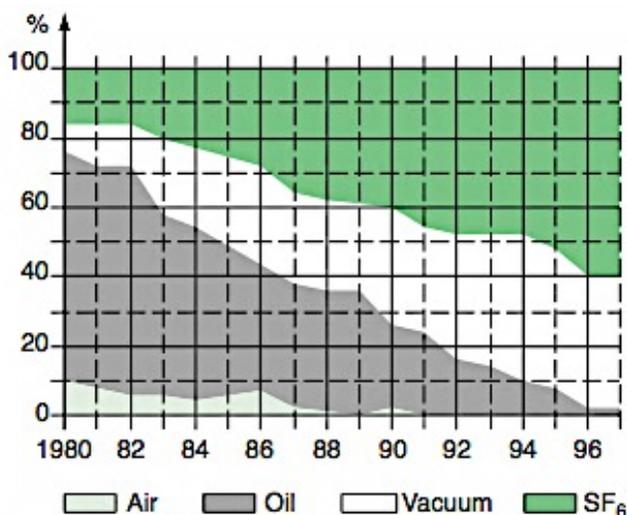


Figura 3.1-1 Evoluzione in Europa del mercato degli interruttori in MT

L'SF₆ e il vuoto sono due tecniche moderne di interruzione nel campo della Media Tensione (da 1 a 52 kV) e Alta Tensione (superiore a 72.5 kV). Sono apparsi negli anni 60 e si sono rapidamente sviluppati dagli anni 70. Oggi hanno rimpiazzato gli interruttori in aria e quegli in olio (Figura 3-1-1).

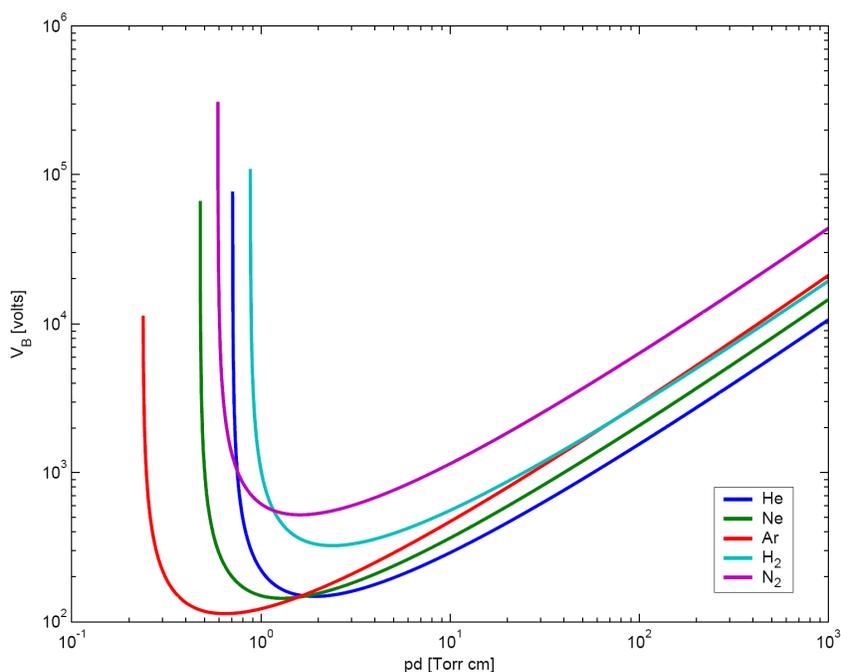
Ogni tecnica ha i suoi lati positivi e negativi. Recentemente gli interruttori a vuoto sono preferiti invece di quegli in SF₆, a causa dell'impatto ambientale, l'SF₆ è un gas ad effetto serra. L'alta capacità d'interruzione dell'interruttore a vuoto

porta a riaccensioni multiple e causa sovratensioni elevate. Questo fenomeno dipende dai parametri del sistema elettrico, dove l'interruttore si trova. Un interruttore installato tra un generatore e un trasformatore, deve subire forti sollecitazioni che comuni interruttori di media tensione non sono in grado di far fronte.

3.2 PROPRIETA' DIELETTICHE DEL VUOTO

Ogni mezzo di interruzione deve essere per prima cosa un buon isolante. Il vuoto ha delle interessanti proprietà dielettriche in comparazione ad altri gas isolanti che sono comunemente usati alla pressione maggiore o uguale a 1 bar. Il vuoto, che è definito "alto" (pressioni comprese tra 10^{-1} e 10^{-5} Pa) di un interruttore a vuoto, è infatti, un gas a pressione molto bassa: tipicamente si ha una pressione di 10^{-6} mbar in un interruttore nuovo. A questa pressione, un volume di 1 mm^3 ancora contiene $27 \cdot 10^6$ molecole di gas. Il concetto di vuoto è relativo e dipende dalla situazione nella quale si opera. Per l'isolamento tra due elettrodi si ammetterà di essere nel vuoto quando una particella si muove da un elettrodo all'altro senza subire urti, quando cioè il suo cammino libero medio è molto più grande della distanza interelettrodica; in tal modo non si possono sviluppare quei fenomeni di ionizzazione che portano alla scarica. A pressioni normali (pressione atmosferica e sopra) la rigidità dielettrica dei gas è rappresentata dalla curva di Paschen (Figura 3-2-1). Il ramo a sinistra del minimo suggerisce che a tendere a zero del prodotto pd la tensione di scarica tende all'infinito. In realtà se, fissata la distanza tra gli elettrodi, si esamina la caratteristica per valori molto bassi della pressione si riscontra un andamento del tipo riportato in Figura 3-2-2.

Figura 3-2-1 Curve di Paschen per alcuni gas



La Figura 3-2-3 riporta il grafico della tensione di scarica V_s in funzione della distanza interelettrodica d con tensione continua tra due elettrodi che realizzano una configurazione di campo a bassa disuniformità per la quale si può assumere che la rigidità dielettrica E_M sia data dal rapporto V_s/d . Le diverse curve corrispondono a elettrodi di differenti materiali. Per distanze di frazioni di mm la curva può essere confusa con un segmento di retta uscente dall'origine e la rigidità dielettrica raggiunge valori dell'ordine di 1000 kV/cm , circa cento volte quella dei migliori gas. Per distanze superiori la dipendenza di V_s da d non è più lineare e per un ampio intervallo può essere espressa come:

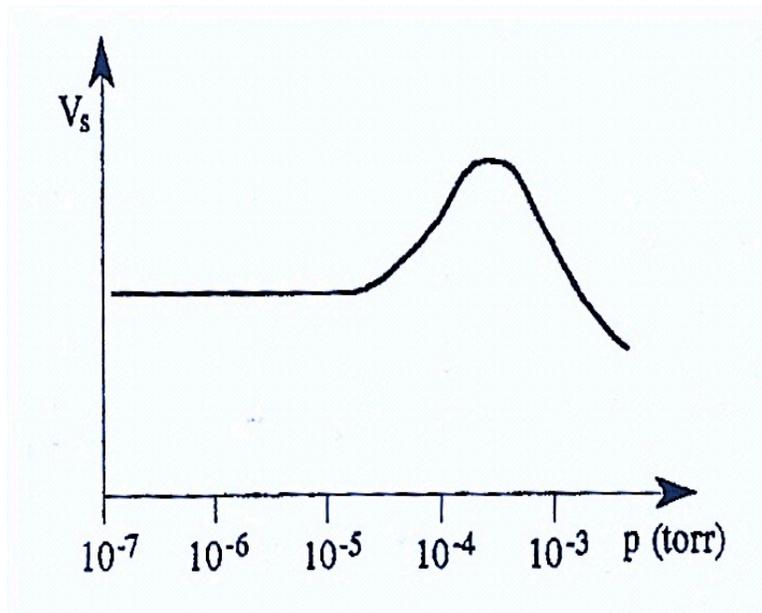
$$V_s = E_M \sqrt{d} \quad (4)$$

Sono state formulate varie ipotesi sul processo di formazione della scarica elettrica nel vuoto; i vari meccanismi acquistano un peso differente a seconda delle situazioni. Le tre ipotesi fondamentali sono:

- La scarica ha origine da fasci di elettroni.
- La scarica è dovuta al sommarsi di azioni secondarie.
- La scarica si forma per effetto di particelle metalliche che le forze del campo strappano dagli elettrodi e che vaporizzano quando collidono con l'elettrodo opposto.

Sulla base di queste ipotesi si comprende come la natura degli elettrodi e in particolare lo stato della superficie giochino un ruolo determinante ai fini del valore della tensione di scarica (Figura 3-2-3).

Figura 3-2-2 Andamento qualitativo della curva di Paschen alle basse pressioni

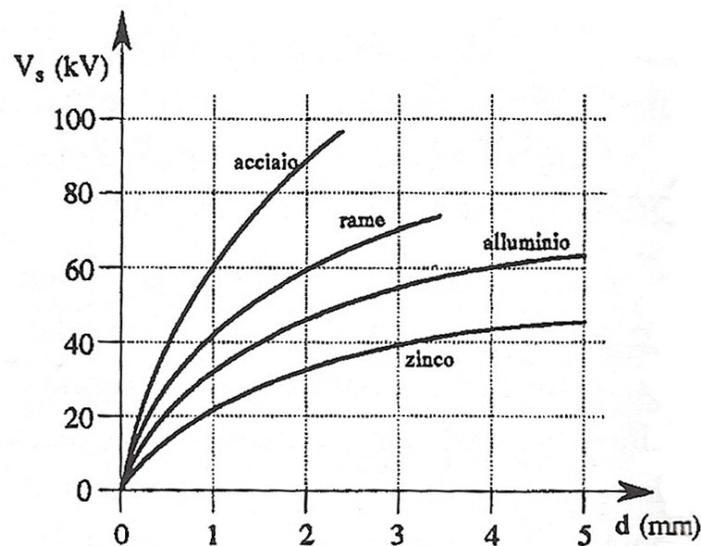


I campi medi alla scarica sono dell'ordine di $10^7 \div 10^8 \text{ V/m}$; se esistono piccole asperità sulla superficie il campo può aumentare localmente anche di un ordine di grandezza, raggiungendo valori di $10^8 \div 10^9 \text{ V/m}$ che determinano una forte emissione per effetto di campo. L'emissione di campo segue l'equazione di Fowler-Nordheim, che in modo semplificato, è scritta:

$$j_e = \frac{AE^2}{\varphi} \exp\left(-\frac{B\varphi^{1.5}}{E}\right) \quad (5)$$

dove j_e è la densità di corrente in A/m^2 , $A = 1.54 \times 10^{-6} \text{ AJV}^{-2}$, E è il campo elettrico in V/m , φ è la funzione di lavoro in eV (4.5 eV per il rame), $B = 6.83 \times 10^9 \text{ VJ}^{-1.5} \text{m}^{-1}$.

Figura 3-2-3 Effetto del materiale degli elettrodi sulla tensione di scarica in campo uniforme

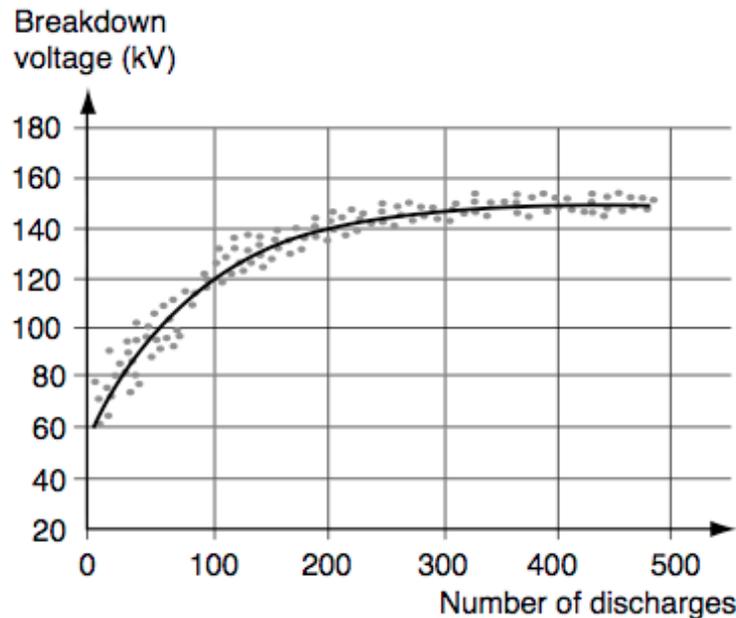


Anche l'estensione della superficie degli elettrodi si riflette sul valore della tensione di scarica, che tende a ridursi all'aumentare dell'area superficiale poiché cresce la probabilità di avere delle irregolarità.

In relazione allo stato delle superfici è da notare che le prestazioni possono essere migliorate, sottoponendo il sistema ad un certo numero di scariche con correnti di limitata intensità, tale operazione viene chiamata condizionamento degli elettrodi (Figura 3-2-4).

Poiché i meccanismi ipotizzati possono manifestarsi simultaneamente, oltre all'emissione primaria del catodo si deve tener conto anche dell'energia acquisita dalle particelle cariche nel gap, che viene rilasciata agli elettrodi tramite il bombardamento. Il suo contributo si somma a quello dell'emissione per effetto di campo, per cui la scarica può innescarsi con campi elettrici meno intensi.

Figura 3-2-4 Effetto del condizionamento sulla tensione di scarica



3.3 PRINCIPI GENERALI D'INTERRUZIONE

Tutti gli interruttori di MT hanno il vantaggio di interrompere la corrente grazie al passaggio per lo zero della corrente alternata.

Una volta che una corrente di guasto è stata stabilita in un circuito, la separazione dei contatti dell'interruttore non ha una ripercussione immediata sul flusso della corrente. In corrispondenza dei punti dell'ultimo contatto, la densità della corrente è molto elevata, che causa una fusione locale con la comparsa di un ponte di metallo liquido. I contatti continuano ad allontanarsi gli uni dagli altri, il ponte riscaldato dalla corrente diventa instabile e alla sua rottura compare un arco elettrico nel vapore creatasi dall'esplosione del ponte liquido. La tensione d'arco che nasce nel vuoto, è piccola rispetto alla tensione dei generatori della rete: la corrente che fluisce nel circuito, non è affetta, né limitata dalla tensione dell'arco.

Se il plasma, che fino ad ora ha consentito il passaggio della corrente, si raffredda molto rapidamente grazie all'apertura dei contatti, si può impedire il riaffermarsi della corrente per il seguente metà ciclo. Il ripristino della tensione transitoria (TTR), imposta dal circuito, appare quindi ai terminali dell'elemento che da uno stato conduttivo ha cambiato ad uno stato di isolamento. Le oscillazioni tra le capacità locali e le induttanze della rete presenti nella fase iniziale, raggiungono frequenze nell'ordine di decine di kHz nella rete in MT e raggiungono un valore di picco superiore alla tensione normale della rete, con un tasso medio di un paio di kV/ms . Se il mezzo isolante tollera lo stress dielettrico che viene applicato ad esso, la corrente viene interrotta con successo.

3.4 IL FENOMENO DELLA SOVRATENSIONE

LA SOVRATENSIONE ASSOCIATA AD UN'INTERRUZIONE IDEALE

Anche nel caso di un interruttore ideale, una certa sovratensione è inerente all'interruzione di un circuito induttivo. La transizione dallo stato di chiuso prima dell'apertura allo stato aperto, porta ad oscillazioni intorno al nuovo stato stazionario e produce sovratensioni rispetto al valore massimo della tensione normale di rete (Figura 3-4-1).

Nel caso di un'interruzione trifase, il fatto che l'interruzione non è simultanea sulle tre fasi, introduce anche in questo caso delle oscillazioni che generano sovratensioni.

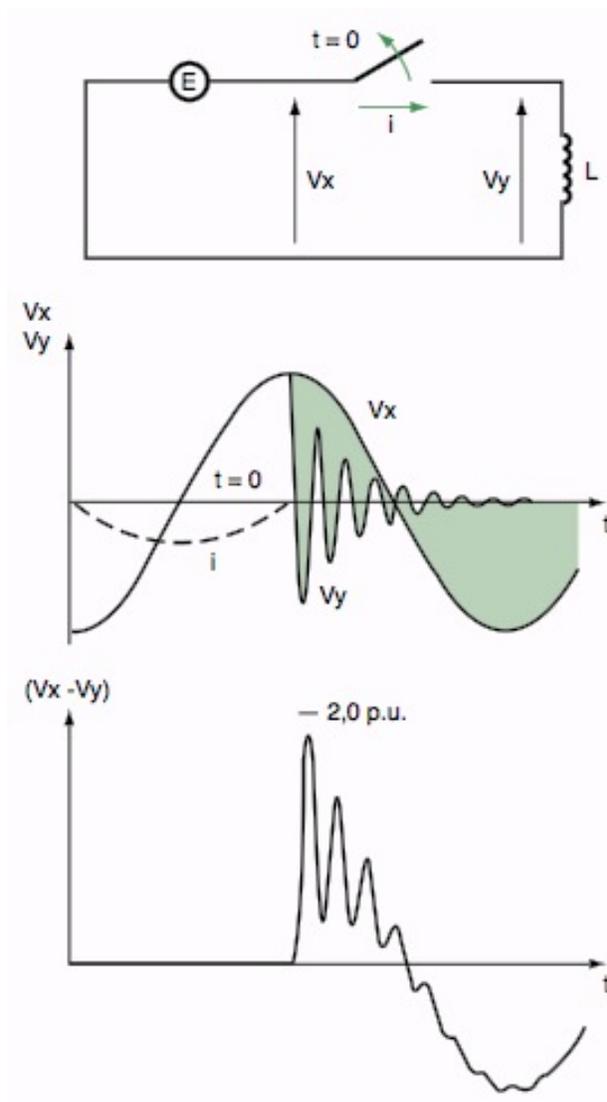


Figura 3-4-1 Sovratensioni nel caso d'interruzione ideale

Il troncamento della corrente descritto prima (l'interruzione prematura della corrente alternata prima che passi per lo zero naturale), è un fenomeno che preoccupa tutti gli interruttori, dato che sono dimensionati per interrompere correnti di corto circuito, quando devono interrompere piccole correnti. Se I_a è il valore della corrente troncata, corrente che circolava in un carico di induttanza L immediatamente prima dell'interruzione, l'energia elettromagnetica immagazzinata nel carico viene scambiata con la capacità C localizzata ai terminali del carico:

$$\frac{1}{2} LI_a^2 = \frac{1}{2} CV^2 \quad (6)$$

L'incremento della tensione sul lato del carico accentua il gap riguardante il regime del circuito aperto e amplifica le sovratensioni associate all'interruzione (Figura 3-4-2).

Nel caso dell'interruttore a vuoto, il troncamento della corrente corrisponde a un'estinzione prematura dell'arco elettrico, dovuta all'instabilità per valori bassi di corrente: questa caratteristica dipende principalmente dal tipo di materiale di cui sono fatti i contatti. I valori della corrente troncata per i materiali più comuni sono dati nella Tabella 1.

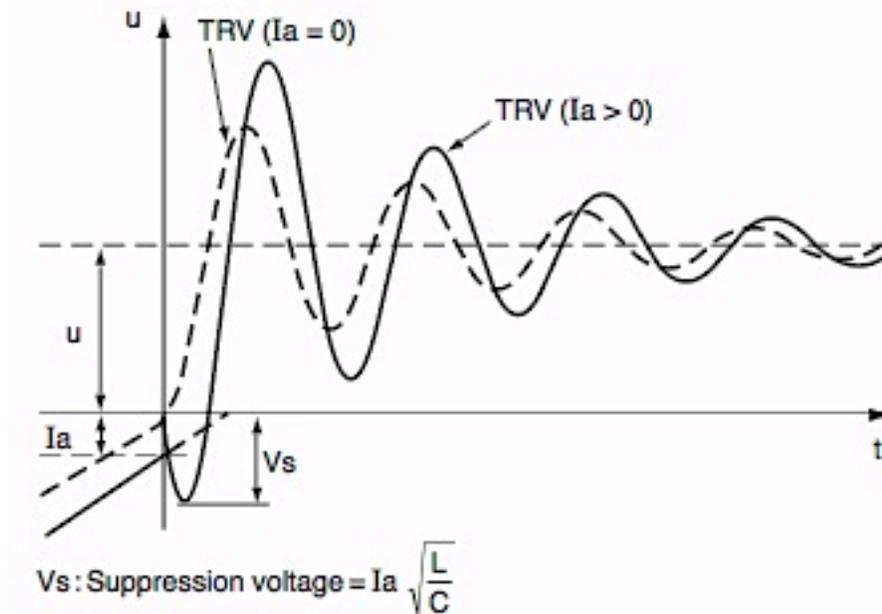
In pratica, i valori della corrente troncata, caratteristici del materiale fatto in CuCr, non pongono problemi. Tuttavia nel caso di materiale fatto in puro rame, il

valore della corrente troncata, non è accettabile.

Tabella 1 Valori medi della corrente troncata per alcuni materiali

Materiale	$I_{\text{troncata medio}} [A]$	$I_{\text{troncata max}} [A]$
Cu	15	21
CuCr	4	8
AgWC	0.5	1.1

Figura 3-4-2 Sovratensioni associate all'interruzione di un circuito con troncamento della corrente



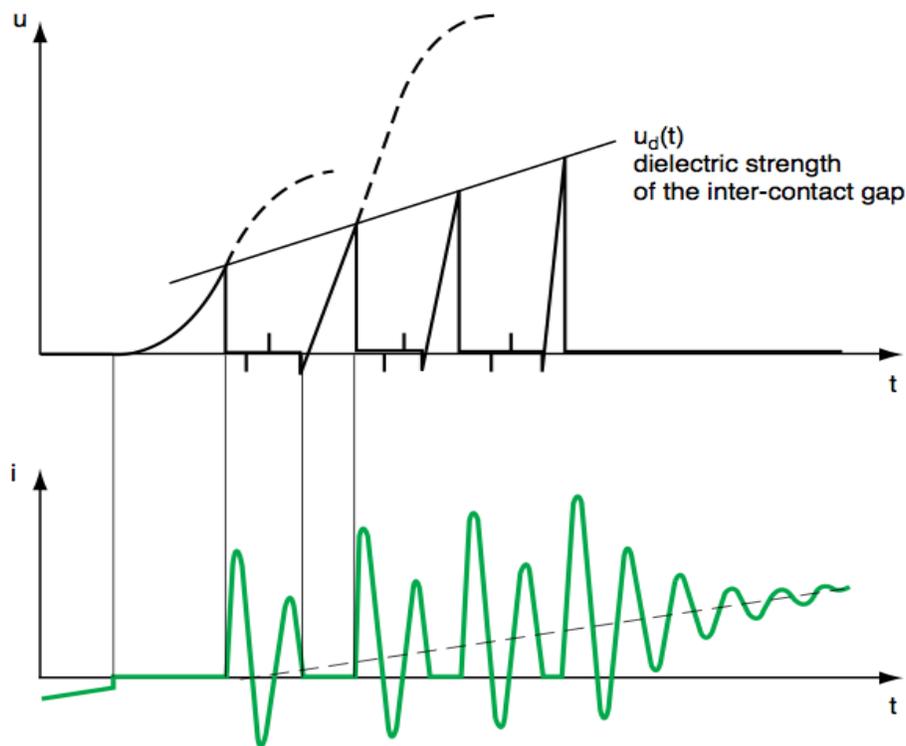
Le oscillazioni durante la preaccensione e la riaccensione raggiungono frequenze elevate (una decina di kHz) che progressivamente si stabilizzano. Questo fenomeno è inevitabile in tutti i tipi di interruttori.

Gli interruttori a vuoto sono caratterizzati dal fatto, che sono in grado di interrompere correnti ad alta frequenza. L'interruzione di correnti ad alta frequenza dà luogo a TTR tra i contatti dove il gap è leggermente variato, questo fenomeno avviene in tempi molto ridotti in confronto al tempo di movimento dei contatti che porta a nuove accensioni e la ripetizione dello stesso fenomeno (Figura 3-4-3). Si ha una successione di accensioni multiple che danno luogo a onde di tensione di amplitudine variabile in funzione del gap. Con la chiusura l'amplitudine delle sovratensioni diminuisce finché i contatti si toccano, invece con l'apertura si ha un aumento delle ampiezze fino a quando il divario tra i contatti è sufficiente a supportare la tensione transitoria di ripristino TTR (TRV – transient recovery voltage), a causa dell'aumento della tensione, la tensione è maggiore rispetto ad un'interruzione normale. Le sovratensioni con fronte ripido, generate dal fenomeno delle accensioni multiple, sono limitate dal gap interelettrodico che è mantenuto. Comunque queste limitazioni sono più efficienti durante la chiusura rispetto all'apertura (Figura 3-4-4). Le caratteristiche di questi due fenomeni simili sono sintetizzati nella Tabella 2.

Tabella 2 Caratteristiche delle sovratensioni associate al fenomeno delle accensioni multiple

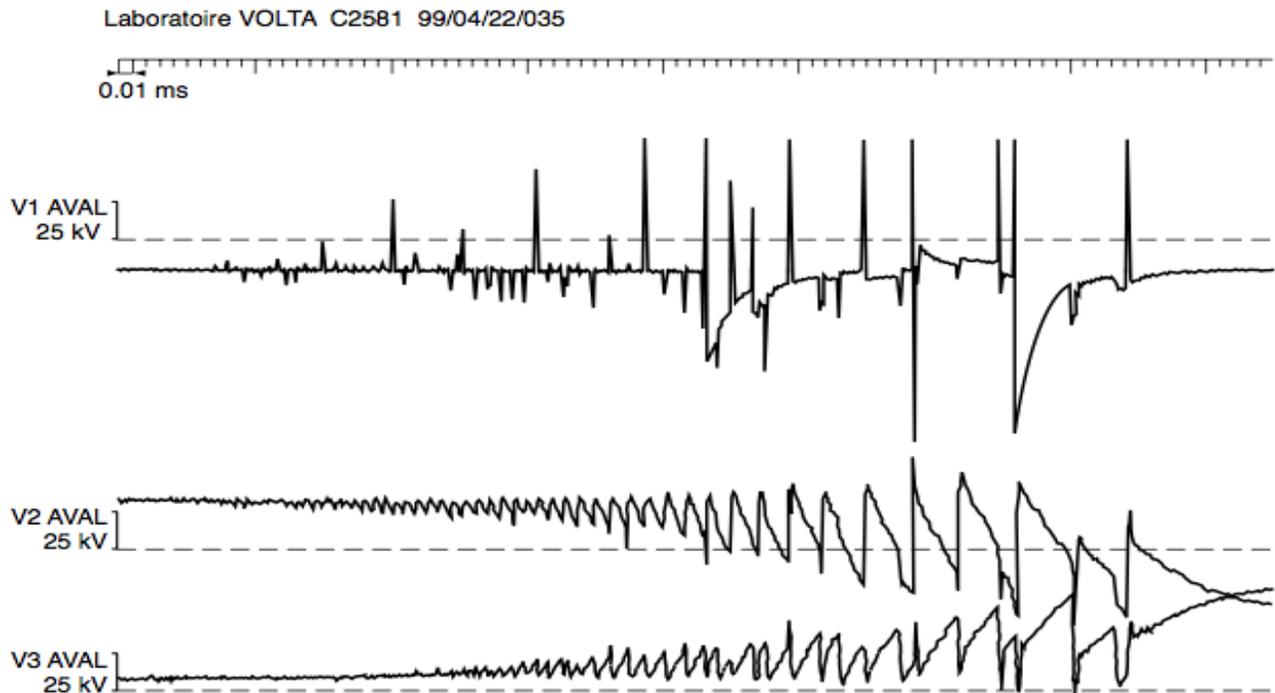
Tipi di accensioni multiple	Avvenimento	Amplitudine delle sovratensioni
Preaccensioni durante la chiusura	Sistematica	Bassa
Riaccensioni durante l'apertura	Occasionale	Alta

Figura 3-4-3 Successione di accensioni multiple associate alle onde di tensione con amplitudini variabili



Lo svantaggio di questo tipo di sovratensioni è dovuto principalmente alla ripidità del fronte d'onda che della sua amplitudine. Queste onde con tempi di salita molto ridotti (compresi tra 0.2 e 0.5 μs) non sono distribuite in maniera uniforme negli avvolgimenti del trasformatore, motore (in generale un carico induttivo) (Figura 3-4-5). Esse possono deteriorare e invecchiare l'isolamento tra gli avvolgimenti. Il troncamento virtuale della corrente è un altro fenomeno, che causa deterioramento negli avvolgimenti dei carichi induttivi.

Figura 3-4-4 Accensioni multiple durante la separazione dei contatti e l'interruzione di piccole correnti induttive



In speciali configurazioni (raramente incontrate nella pratica), che sono caratterizzate da accoppiamenti capacitivi/induttivi tra le fasi, le riaccensioni multiple sulla prima fase che sta per essere interrotta, portano non solo a significative oscillazioni delle correnti ad alta frequenza nella fase in questione, ma anche nelle altre fasi dove circolano correnti consistenti, che sono lontane dallo zero naturale (il passaggio per lo zero della corrente alla frequenza di rete). Se le correnti ad alta frequenza indotte raggiungono ampiezze maggiori rispetto alle correnti alla frequenza di rete, si creano dei “zeri artificiali”. Il dispositivo d’interruzione sfrutta questo artificio per troncare le correnti prima che passino per lo zero naturale. In questi casi le correnti troncate possono essere di una decina, anche centinaia di ampere e le sovratensioni associate sono molto alte.

4. INTERAZIONE TRA LE FASI

In un sistema trifase i fenomeni possono essere molto più complicati che nel caso di sistemi monofase a causa dell’interazione tra le fasi. Solo in rari casi l’influenza delle altre fasi può essere trascurata. L’accoppiamento interfase, che può essere di tipo magnetico o capacitivo o combinazione delle due, può essere suddiviso in funzione dei fenomeni in due differenti classi:

- Casi in cui il processo di interruzione in una fase è influenzata dagli eventi nell’altra fase, come ad esempio:
 - ✓ Troncamento della corrente indotta
 - ✓ Riaccensione indotta
- Casi in cui le sovratensioni in una fase sono influenzate da eventi nell’altra fase senza ulteriori riaccensioni. Il trasferimento dell’energia può essere dovuto a:
 - ✓ Sovratensioni dovute al troncamento di corrente

- ✓ Riaccensioni transitive

4.1 TRONCAMENTO DELLA CORRENTE INDOTTA

L'interruzione della corrente prima dello zero naturale della corrente alla frequenza di rete può essere causata da fenomeni transitive indotte dalle altre fasi. Le correnti ad alta frequenza indotte "creano zeri" in quale l'interruzione può aver luogo. Il troncamento virtuale della corrente è un esempio di troncamento di corrente indotta.

4.2 RIACCENSIONI INDOTTE

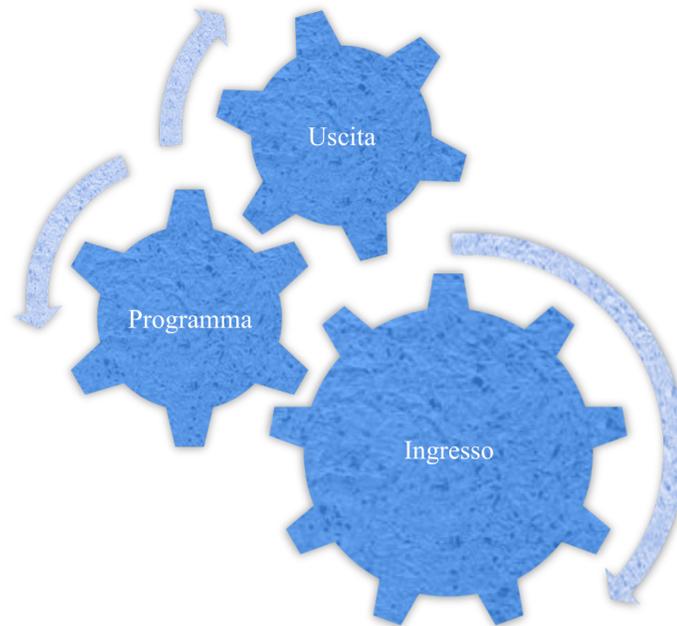
Ogni trasferimento di energia da una fase ad un'altra dopo un'interruzione può portare a sovratensioni lungo un polo aperto di un interruttore. Questa può causare una riaccensione in questo polo, è tutto il processo d'interruzione può cambiare drasticamente. Questo è un fenomeno statistico ed è molto difficile da analizzare.

4.3 SOVRATENSIONI INDOTTE DOVUTE A MANOVRE SULLE ALTRE FASI

Le sovratensioni indotte possono essere trasferite da accoppiamenti magnetici e/o capacitivi. Il tipo di accoppiamento ha importanza diversa in funzione della natura transitive. Normalmente le sovratensioni causate dal troncamento della corrente di una fase sono trasferite sulle altre fasi da accoppiamenti magnetici.

5. DETERMINAZIONE DELLE TENSIONI TRANSITORIE

Negli anni passati sono stati fatti molti studi sulle tensioni transitorie nei sistemi industriali. Spesso le maggiori differenze dei parametri di un sistema in differenti test non permettono l'analisi e la correlazione di dati in una base comune. Un approccio ottimo per studiare e capire i fenomeni transitori è prendere in considerazione tutti i parametri come le capacità sul lato della sorgente e del carico, il materiale e la configurazione dei contatti dell'interruttore. L'implementazione più efficiente per quest'approccio, è usare un programma per modellare l'interazione tra l'interruttore a vuoto e il sistema elettrico. I dati d'ingresso per il programma includono i dati del sistema di alimentazione (tensione, frequenza, lunghezza cavi e impedenza della sorgente, il numero dei cavi del lato sorgente), i dati del carico (potenza nominale del trasformatore, fattore di potenza ecc.), i dati del sistema di protezione e i dati dell'interruttore a vuoto o del sistema d'interruzione. Per avere dei risultati realistici, è necessario che i dati d'ingresso siano molto accurati. Per ricavare i dati dell'interruttore a vuoto sono necessarie migliaia di test per accumulare e analizzare i dati e convertire in dati utili per l'ingresso del programma.

Figura 5-1 La relazione Ingresso-Programma-Uscita

I dati in uscita dal programma rappresentano probabilità cumulativa delle tensioni transitorie di picco tra il terminale del carico e la terra dovute alle riaccensioni nell'interruttore. Le riaccensioni possono avvenire in corrispondenza a tensioni transitorie relativamente basse quando i contatti aprono vicino allo zero naturale della corrente. In un dato sistema, le riaccensioni possono verificarsi anche per tensioni inferiori 1 p.u. del valore di cresta della tensione.

Figura 5-2 Probabilità cumulativa della corrente troncata in un interruttore a vuoto

Figura 5-3 Probabilità cumulativa della tensione di rottura alla frequenza normale dell'interruttore a vuoto

Figura 5-4 Probabilità cumulativa della tensione di rottura ad alta frequenza

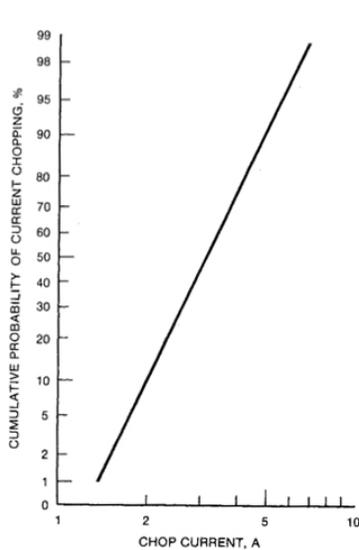


Fig. (5-2)

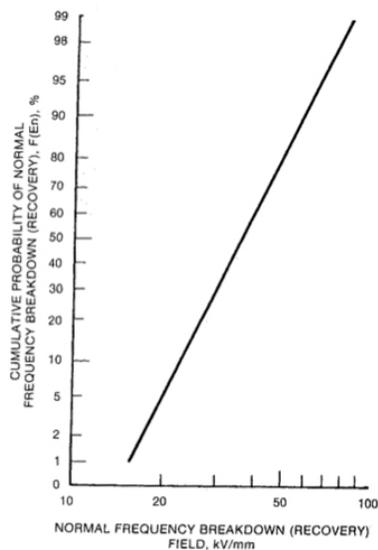


Fig. (5-3)

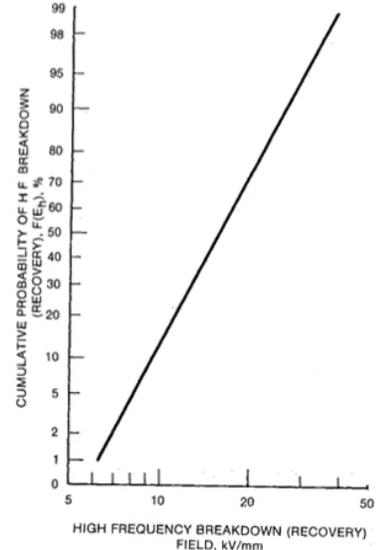


Fig. (5-4)

6. ANALISI DELLA DISTRIBUZIONE DELLA TENSIONE NEGLI AVVOLGIMENTI DI UN TRASFORMATORE IN MT DURANTE LA PREACCENSIONE IN UN INTERRUTTORE

6.1 INTRODUZIONE

Durante le manovre di apertura/chiusura su carichi prevalentemente induttivi come i trasformatori e i motori, in specifiche condizioni di funzionamento, possono accadere preaccensioni multiple nel dispositivo di interruzione. Le sovratensioni derivanti procedono lungo i cavi e raggiungono i terminali del trasformatore o motore. A causa delle differenti impedenze ai terminali, le onde vengono riflesse ed assorbite. Le oscillazioni della tensione negli avvolgimenti sono sovrapposte e nel tempo variano l'ampiezza e il tempo di salita. Queste onde non sono linearmente distribuite negli avvolgimenti e quindi l'isolamento non è stressato in maniera uniforme.

La tensione transitoria è misurata ai terminali del trasformatore ed è difficile predire la distribuzione della tensione lungo gli avvolgimenti. In vari laboratori sono stati studiati tanti modelli computazionali di trasformatori, la cui elaborazione è molto complicata, perché la maggior parte delle volte non si conoscono la geometria e le dimensioni degli avvolgimenti. In questo documento voglio descrivere una parte del lavoro svolto da un gruppo di lavoro, dove sono stati investigati gli effetti della preaccensione. Le onde di tensione sono state misurate ai terminali di un

trasformatore e sono stati usati come parametri d'ingresso per un modello di trasformatore.

6.2 DESCRIZIONE DEL TRASFORMATORE

Il trasformatore sul quale sono stati eseguiti i test, è trifase (Figura 6-2-1). I parametri più importanti sono sintetizzati nella Tabella 3. Le misure ed i calcoli della tensione sono stati eseguiti soltanto su una fase, mentre le altre non erano connesse alla fase oggetto dello studio.

Figura 6-2-1 Il trasformatore sul quale sono stati eseguiti i test



Tabella 3 Dati del trasformatore

Potenza nominale	630 <i>kVA</i>
Rapporto di trasformazione	15375 <i>V</i> / 400 <i>V</i>
Perdite a vuoto	770 <i>W</i>
Corrente a vuoto	0.3 %
N° strati (lato MT)	10
N° spire in un strato	~ 140
Raggio interno avvolgimenti MT	135.3 <i>mm</i>
Raggio esterno avvolgimenti MT	163.3 <i>mm</i>
Raggio interno avvolgimenti BT	97 <i>mm</i>
Diametro conduttore	3.0 <i>mm</i>
Isolamento doppio conduttore	0.1 <i>mm</i>
Distanza tra strati	0.4 <i>mm</i>
Altezza bobina	425 <i>mm</i>

6.3 RAPPRESENTAZIONE DEL TRASFORMATORE

Il trasformatore studiato è un prototipo particolare prodotto per questa ricerca. Questo trasformatore ha punti di misurazione su ogni fase installata. Il serbatoio e l'olio sono stati rimossi per avere accesso diretto agli avvolgimenti. Nella Figura 6-3-1 è rappresentato il trasformatore costituito da induttanze e capacità. La matrice delle induttanze è formata dalle induttanze proprie di un gruppo di avvolgimenti e dalle mutue induttanze tra gli avvolgimenti. La matrice delle capacità è formata dalle capacità tra gli strati e le capacità tra l'alto ed il basso degli strati con il serbatoio del trasformatore.

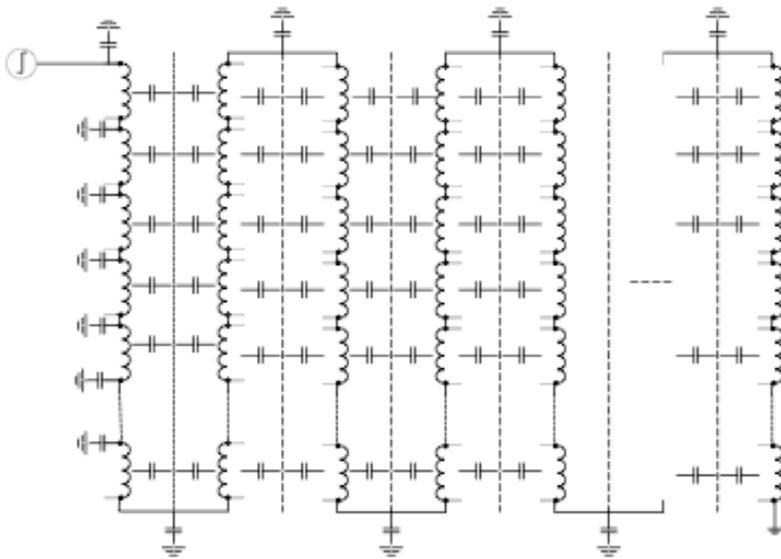


Figura 6-3-1 Trasformatore fatto da capacità ed induttanze

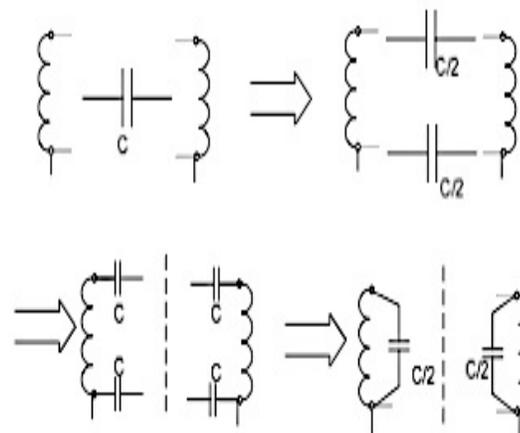
Il trasformatore rappresentato nella Figura 6-3-1 può essere semplificato. Si è considerato una superficie equipotenziale tra gli strati. In questo modo un gruppo di avvolgimenti può essere diviso come indicato nella Figura 6-3-2.

Nella Figura 6-3-3 è indicato il modello finale del trasformatore. In questo caso le capacità verso terra sono piccole, perché l'alto e il basso della bobina hanno una

superficie piccola ed è stimata minore di 1 pF.

Le induttanze sono state calcolate utilizzando le equazioni di Maxwell. La matrice **L** ha sulla diagonale elementi che corrispondono ad un gruppo di avvolgimenti. Gli elementi che non stanno sulla diagonale sono le mutue induttanze tra i diversi gruppi di avvolgimenti. Per semplicità si è assunto un numero costante di avvolgimenti in un gruppo.

Figure 6-3-2 Semplificazione di una sezione del trasformatore



Il trasformatore testato ha 10 strati e circa 142 spire per strato. Ogni strato è diviso in 10 gruppi con 14 spire per gruppo. Si è assunto che uno strato è costituito da 10 gruppi. La matrice **L** è una matrice quadrata di ordine 100. La matrice delle capacità è invece una matrice quadrata di ordine 101. Le matrici dell'impedenza **Z** e dell'ammettenza **Y** sono determinate:

$$Z = \left(j\omega + \sqrt{\frac{2\omega}{\sigma\mu_0 d^2}} \right) L \tag{7}$$

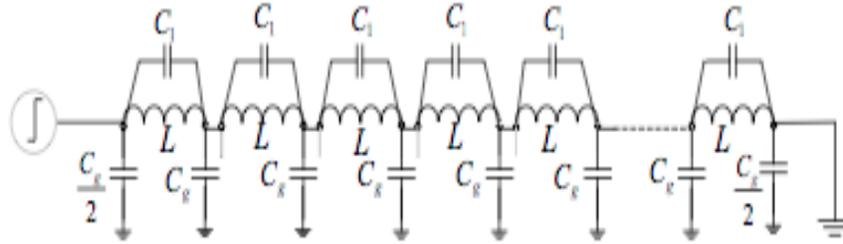
$$Y = (j\omega + \omega \tan \delta) C \tag{8}$$

dove d è la distanza tra gli strati;

σ è la conducibilità del conduttore;

$\tan \delta$ è il fattore di dissipazione dell'isolamento.

Figura 6-3-3 Modello finale del trasformatore



6.4 MODELLO DEL TRASFORMATORE

Il modello del trasformatore è costruito utilizzando le equazioni generali per le tensioni e le correnti:

$$\frac{dV_i(x)}{dx} = \sum_{j=1}^N - \int_0^{\lambda_j} Z_{ij}(x, \beta) I_j(\beta) \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (9)$$

$$\frac{dI_i(x)}{dx} = \sum_{j=1}^N - \int_0^{\lambda_j} Y_{ij}(x, \beta) V_j(\beta) \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (10)$$

$I_j(\beta)$ è la corrente induttiva alla distanza β nella j -esima spira, e $Z_{ij}(x, \beta)$ è la funzione mutua impedenza. L'impedenza propria e la mutua impedenza dipendono dalla frequenza. $V_j(x)$ e $I_j(\beta)$ sono le trasformate di Fourier rispettivamente di $V_i(x, t)$ e $I_j(\beta, t)$. λ_j rappresenta la lunghezza della j -esima spira. Considerando soltanto un avvolgimento, il calcolo può essere semplificato, utilizzando la relazione matriciale:

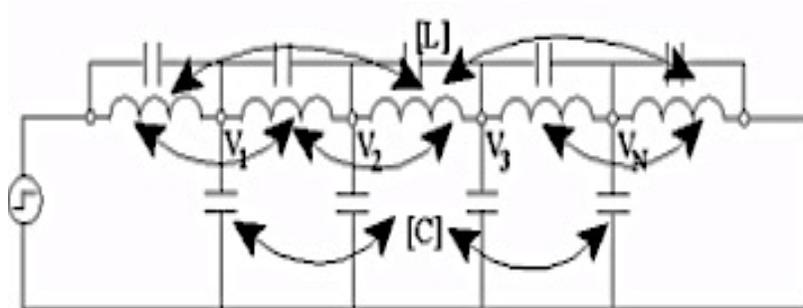
$$\begin{bmatrix} I_B \\ V' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_B \\ V' \end{bmatrix} \quad (11)$$

dove V_B rappresenta le tensioni ai terminali della spira, e I_B rappresenta le correnti entranti e valgono $V_B = \begin{bmatrix} V_S \\ V_R \end{bmatrix}$, $I_B = \begin{bmatrix} I_S \\ -I_R \end{bmatrix}$. Applicando la relazione matriciale di sopra, posso calcolare la tensione nei nodi interni:

$$V' = (1 - D)^{-1} C V_B \quad (12)$$

Le soluzioni nel dominio del tempo si calcolano utilizzando l'inversa della trasformata di Fourier.

Figura 6-4-1 Circuito equivalente di un avvolgimento del trasformatore



Il modello è stato verificato applicandolo al circuito nella Figura 6-4-1.

I parametri del circuito: $L_{kk}=0.27$ H, $k=1,2,\dots,6$. Le mutue induttanze tra le sezioni: $L_{12}=L_{23}=L_{34}=L_{45}=L_{56}=0.255$ H, $L_{13}=L_{24}=L_{35}=L_{46}=0.235$ H, $L_{14}=L_{25}=L_{36}=0.216$ H, $L_{15}=L_{26}=0.199$ H, $L_{16}=0.183$ H. Le capacità in serie per sezione sono $C_1=400$ pF e le capacità di shunt per sezione sono $C_0=400$ pF.

La soluzione analitica del problema è rappresentata nella Figura 6-4-3, invece nella Figura 6-4-2 sono rappresentate le tensioni calcolate del modello.

Si può notare che c'è un buon accordo tra i tutti risultati e quindi il metodo di rappresentazione degli avvolgimenti del trasformatore può essere applicato con successo.

Figura 6-4-2 Le tensioni calcolate del modello

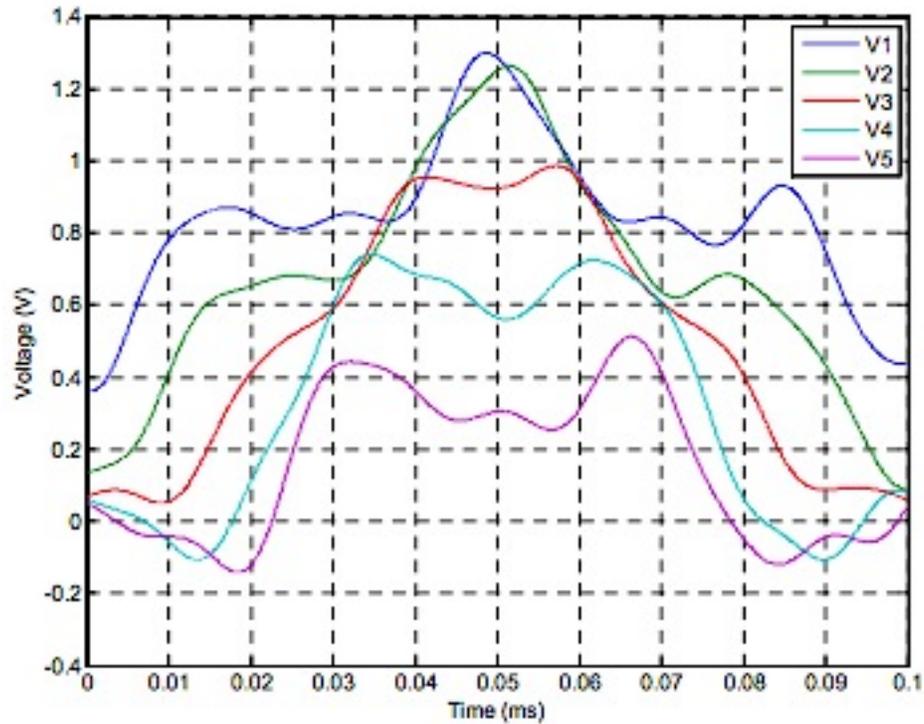
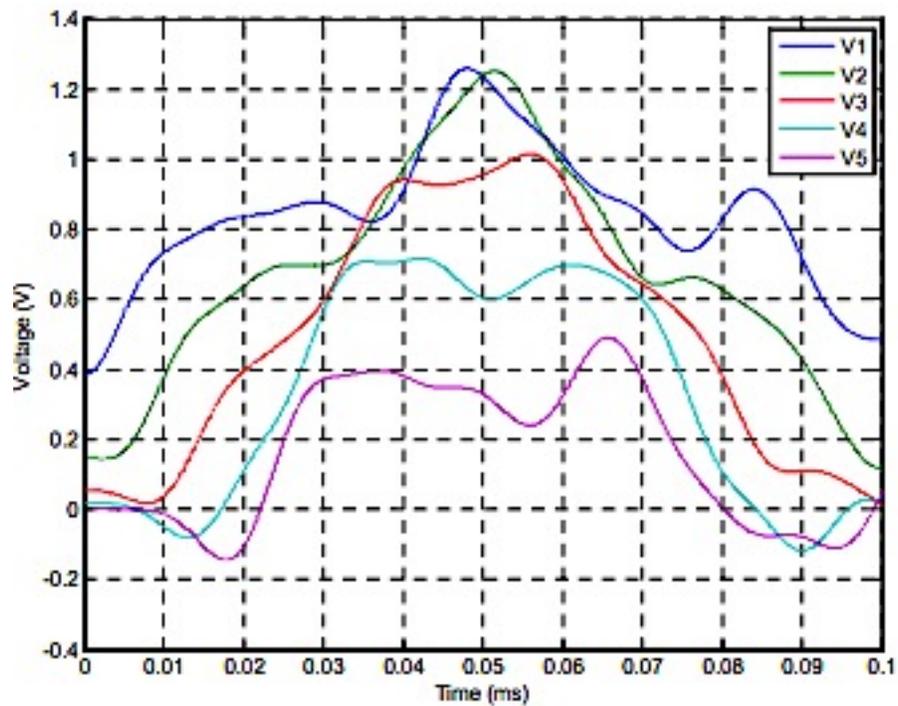


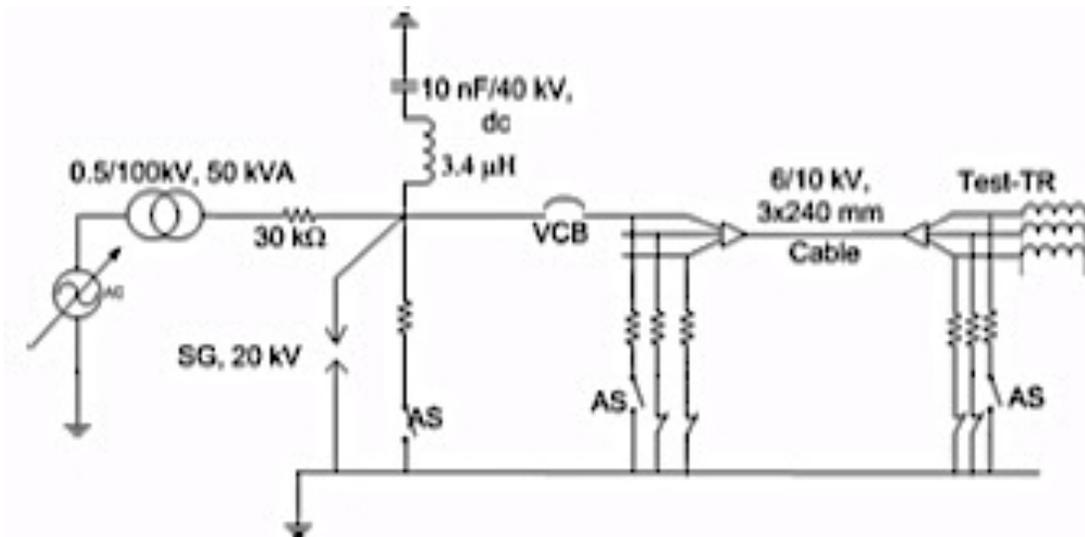
Figura 6-4-3 Soluzione accurata analitica del problema



6.5 DESCRIZIONE DEL TEST ED I RISULTATI

Il circuito con il quale è stata eseguita l'esperienza è indicato nella Figura 6-5-1. Il trasformatore di alimentazione, è un trasformatore speciale di laboratorio con il rapporto $0.5/100\text{ kV}$ e potenza nominale di 50 kVA . Sul lato MT è stato installato un resistore da $30\text{ k}\Omega$ per limitare la corrente del carico e per proteggere il trasformatore da correnti elevate. Il circuito è stato realizzato per piccole correnti per non danneggiare il trasformatore.

Figura 6-5-1 Il circuito con il quale è stato eseguito il test sul trasformatore di prova



Durante le manovre, accadde il fenomeno della preaccensione nell'interruttore a vuoto (VCB – vacuum circuit breaker), le onde si sono propagate lungo il cavo fino agli avvolgimenti del trasformatore di prova. Le prove sono state eseguite con differenti valori di tensione, tensioni che vanno da 4 kV a 12 kV , con e senza il cavo. I risultati dell'analisi analitica e delle misurazioni non corrispondono perché nell'analisi non sono stati considerati tutti i 10 strati con 140 spire ognuna. Durante l'alimentazione del trasformatore, una preaccensione si è verificata, prima che i contatti dell'interruttore si toccassero. Analizzando i dati raccolti durante i test si è visto come si sospettava, che maggiore è la tensione di alimentazione, maggiore è la durata delle preaccensioni. La frequenza delle oscillazioni della corrente è intorno a 280 kHz . Questa frequenza normalmente dipende dalla capacità equivalente sul lato dell'alimentazione, la capacità equivalente sul lato del carico e l'induttanza del cavo. L'ampiezza della corrente durante la seconda preaccensione come si vede nella Figura 6-5-2 è minore rispetto alla prima preaccensione, perché essa dipende dalla tensione tra i contatti dell'interruttore che sono in grado di tenere. La preaccensione avviene quando la tensione transitoria di ripristino TTR (TRV - transient recovery voltage) è maggiore della tensione che è in grado di supportare l'interruttore tra i suoi contatti. Quando i contatti si avvicinano tra di loro, la tensione che i contatti sono in grado di tenere è minore e la corrente diminuisce di conseguenza.

Figura 6-5-2 La tensione misurata e calcolata nella fase B del trasformatore con tensione applicata da 6 kV e la corrente misurata nell'interruttore

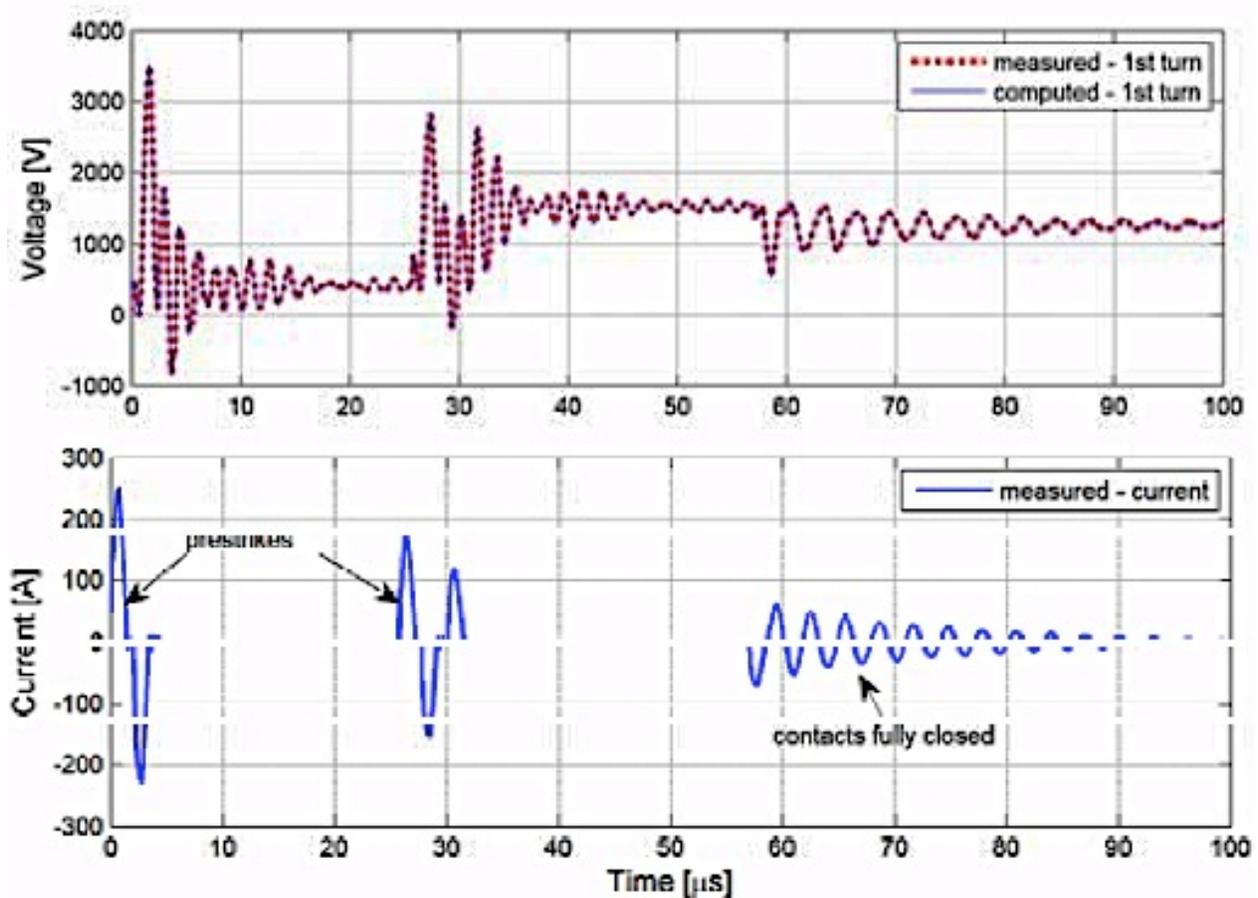
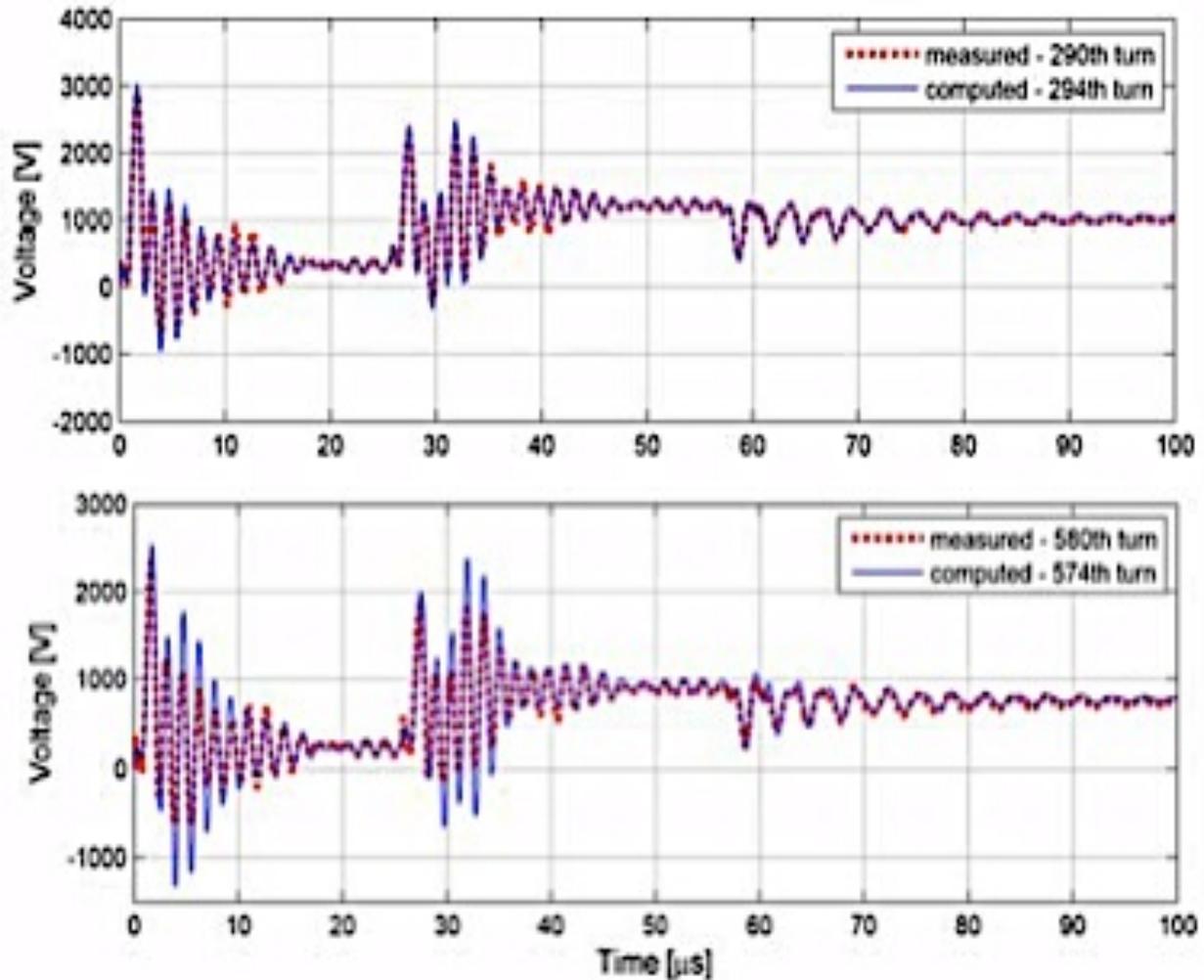


Figura 6-5-3 La tensione misurata e calcolata in specifiche spire nella fase B durante l'alimentazione del trasformatore con tensione applicata da 6 kV



Nelle figure le linee solide rappresentano i risultati calcolati, mentre i punti sono i risultati misurati.

Nella Figura 6-5-4 sono rappresentate le tensioni misurate e calcolate alimentando il trasformatore con una tensione di 8 kV. Le tensioni transitorie nella 290-esima e 294-esima spira sono misurate e calcolate.

Nella Figura 6-5-5 sono indicate le tensioni misurate e calcolate alimentando il trasformatore con una tensione di 8 kV in assenza del cavo. In tutti i casi si è riscontrato una tensione maggiore in assenza del cavo tra l'interruttore a vuoto ed il trasformatore, questo perché in presenza del cavo la tensione si divide tra il cavo ed il trasformatore.

Si nota che la preaccensione si attenua rapidamente e la tensione diminuisce dopo l'estinzione dell'arco.

Figura 6-5-4 Tensioni misurate e calcolate nella fase B durante l'alimentazione del trasformatore con una tensione applicata di 8 kV (figura in alto); zona 1, i primi 30 μs (figura in mezzo); zona 2, 40 – 70 μs (figura in basso)

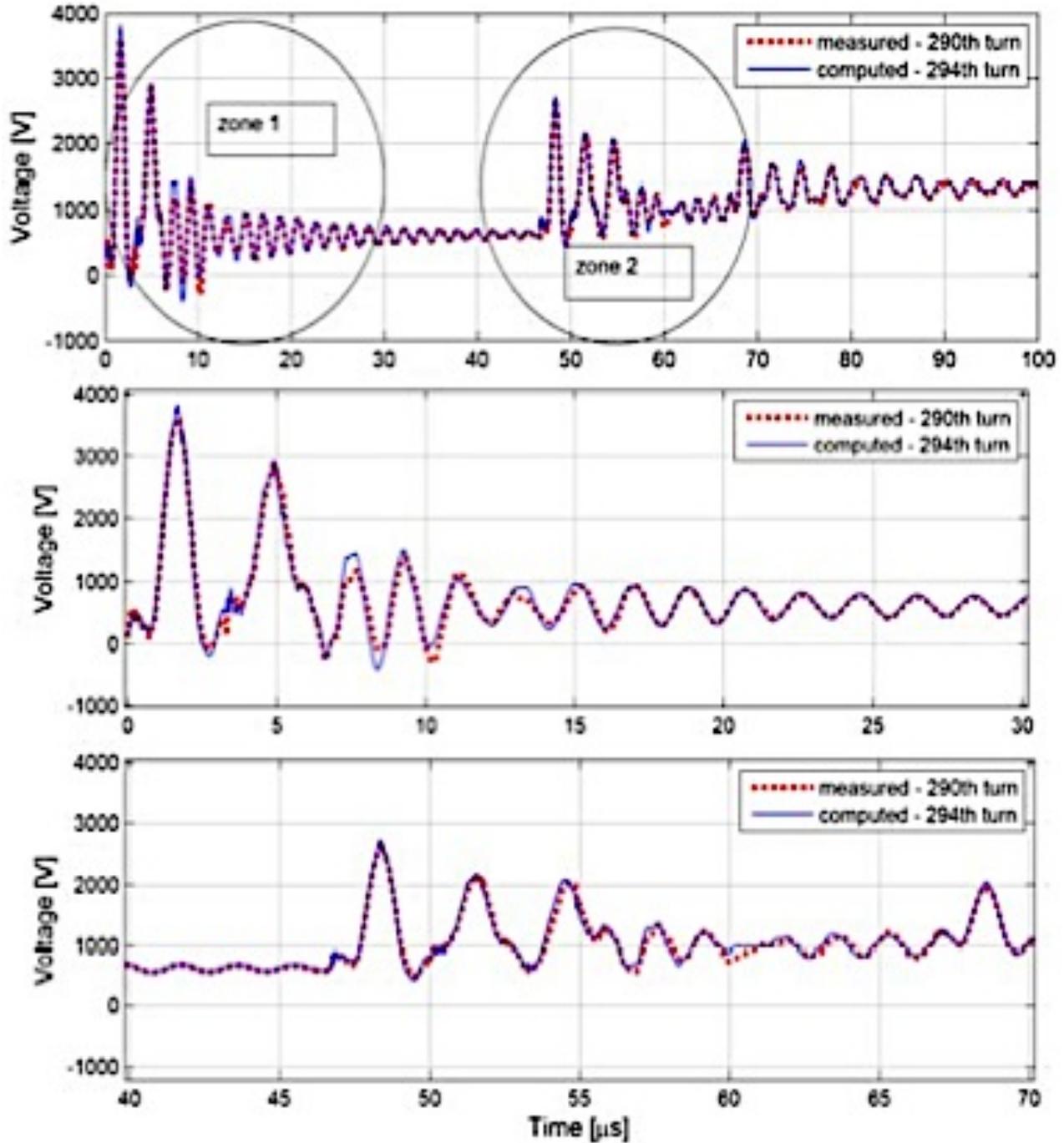
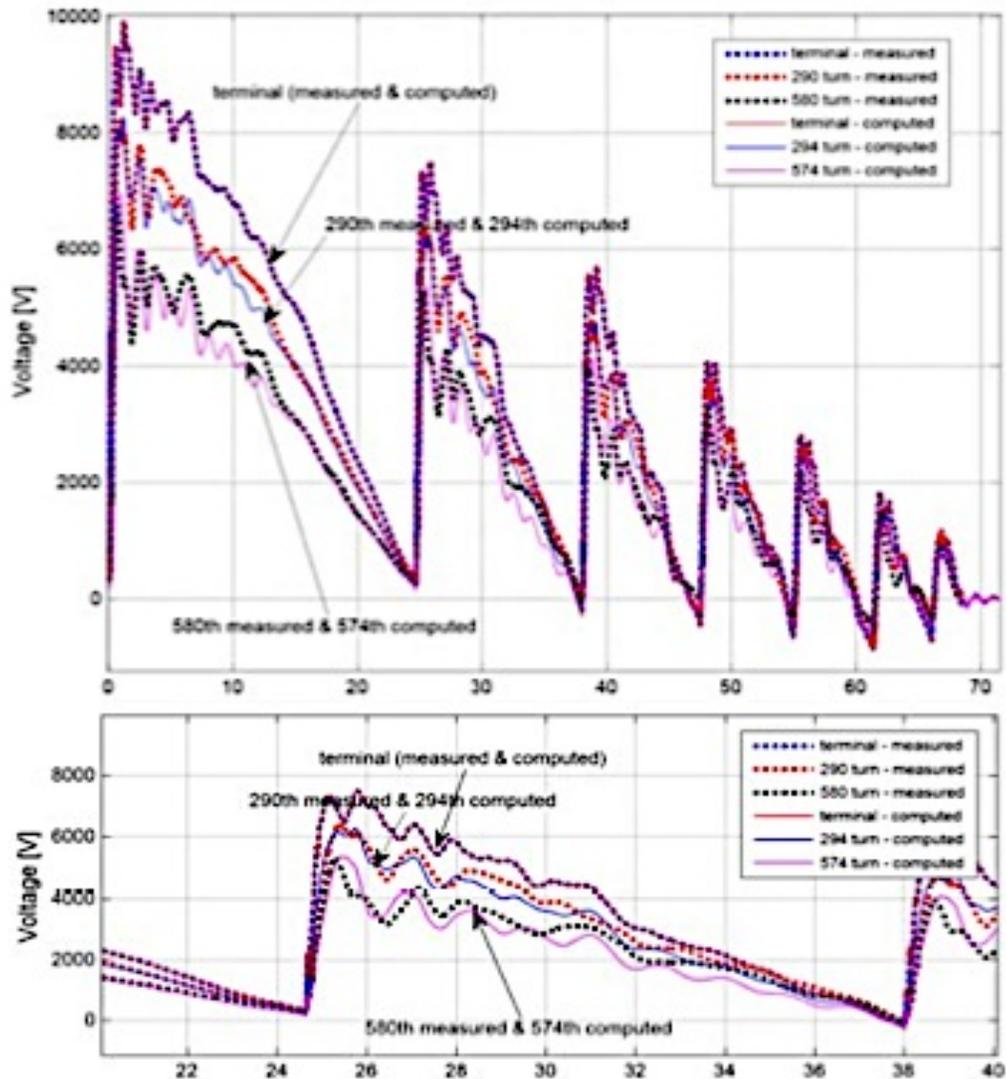


Figura 6-5-5 Tensioni misurate e calcolate nella fase B (figura in alto); scala temporale incrementata (figura in mezzo); la tensione di alimentazione è di 8 kV



6.6 CONCLUSIONI

Analizzando la distribuzione della tensione tra gli avvolgimenti durante il fenomeno della preaccensione si è notata una distribuzione non lineare della tensione.

Inoltre dai risultati si può vedere come il cavo tra l'interruttore a vuoto e il trasformatore influisce sulle ampiezza e la frequenza di oscillazione della tensione. Il cavo contribuisce con maggiori frequenze di oscillazione della tensione e minori ampiezze, mentre compiendo le manovre sull'interruttore in assenza del cavo, si avevano onde più ripide della tensione e durata limitata della corrente.

Dall'esperienza eseguita dai ricercatori inoltre si è concluso che le equazioni del telegrafista sul modello del trasformatore a parametri concentrati possono essere usati con successo per studiare le tensioni transitorie lungo gli avvolgimenti del trasformatore. Il modello applicato è di tipo generale e si presta per l'analisi della distribuzione della tensione negli avvolgimenti di un trasformatore durante le sovratensioni atmosferiche. Il modello è stato usato per la chiusura dell'interruttore ma può essere usato anche per le manovre di apertura.

7. EQUAZIONI FONDAMENTALI PER LO STUDIO DEI TRANSITORI IN TRASFORMATORE TRIFASE

7.1 INTRODUZIONE

Per la valutazione delle sovratensioni causate dall'interruzione della corrente magnetizzante, spesso si fa uso di modelli computazionali del trasformatore e in generale del sistema "interruttore-trasformatore". Si è preso in considerazione un trasformatore trifase a tre colonne, lato a triangolo, poiché è comune nei sistemi in MT.

7.2 TRASFORMATORE A TRE COLONNE

Nella Figura 7-2-1 è visualizzato il lato del trasformatore collegato a triangolo con le relative capacità, somma delle capacità equivalenti e quelle esterne.

Per il seguente trasformatore è stato costruito un modello computazionale, basato su equazioni che descrivono il comportamento dinamico e a regime.

Le relazioni tra le tensioni e le correnti, indicati nella Figura 7-2-1 sono:

$$v_1 = v_a - v_b, v_2 = v_b - v_c, v_3 = v_c - v_a \quad (13)$$

$$\left(i_a - C \frac{dv_a}{dt}\right) + \left(i_3 + \frac{v_3}{R}\right) - \left(i_1 + \frac{v_1}{R}\right) = 0 \quad (14)$$

$$\left(i_b - C \frac{dv_b}{dt}\right) + \left(i_1 + \frac{v_1}{R}\right) - \left(i_2 + \frac{v_2}{R}\right) = 0 \quad (15)$$

$$\left(i_c - C \frac{dv_c}{dt}\right) + \left(i_2 + \frac{v_2}{R}\right) - \left(i_3 + \frac{v_3}{R}\right) = 0 \quad (16)$$

$$R = \frac{N^2 A}{al} \quad (17)$$

(dove N = numero di spire, A = area del nucleo, l = lunghezza del percorso magnetico)

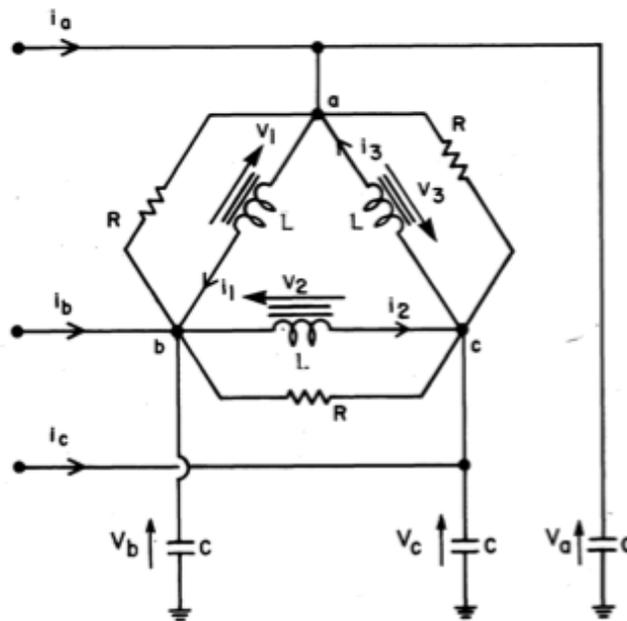
rappresenta una resistenza che congloba le costanti empiriche a , b e c che dipendono dall'andamento dell'induzione B in funzione del campo magnetico H . Risolvendo le equazioni dal (13) al (16) ottengo la seguente equazione finale:

$$\frac{CN^2A}{3l}B_1'' + aB_1' + \frac{B_1}{\mu_1} = \frac{N}{3l}(3i_0 + i_a - i_b) \quad (18)$$

dove

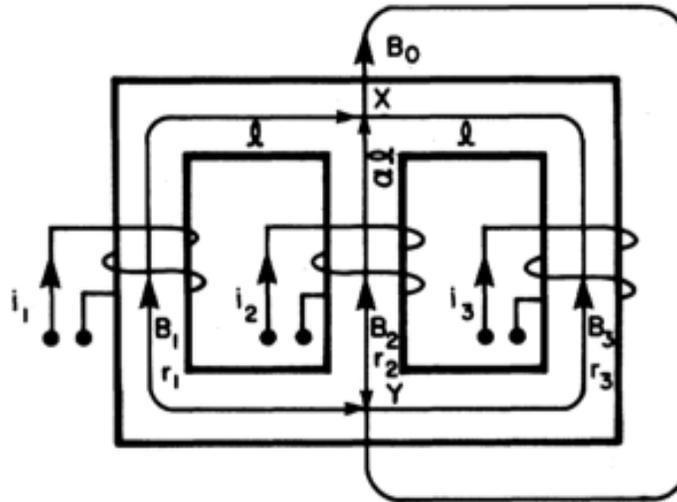
$$3i_0 = i_1 + i_2 + i_3 \quad (19)$$

Figura 7-2-1 Connessione a triangolo di un trasformatore



L'equazione (18) insieme alle relative identiche equazioni per B_2 e B_3 descrivono i transitori magnetici in un trasformatore trifase a vuoto costituito da tre trasformatori monofase collegati a triangolo.

Figura 7-2-2 Trasformatore a tre colonne



7.2.1 MODELLO DEL NUCLEO

A causa della geometria del trasformatore a tre colonne, la colonna centrale fornisce un percorso magnetico X-Y più breve rispetto alle colonne laterali. Le riluttanze delle colonne dipendono in maniera differente dalle rispettive densità di flusso, con conseguente asimmetria del circuito magnetico. La riluttanza r è legata alla densità del flusso B attraverso la permeabilità μ come segue:

$$r_k = \frac{l}{\mu_k A} \quad \text{per } k = 1,3 \quad (20)$$

$$r_2 = \frac{\alpha l}{\mu_2 A} \quad (21)$$

dove l è la lunghezza del percorso magnetico X-Y associato alle colonne laterali, e αl è la lunghezza del percorso magnetico X-Y associato alla colonna centrale con ($1 > \alpha > 0$). Per $\mu_1 \neq \mu_3$, r_1 e r_3 avranno valori diversi.

Il flusso totale in ogni colonna ha tre componenti corrispondenti alle correnti nei tre avvolgimenti. La riluttanza è legata al flusso totale di ogni colonna secondo la relazione matriciale:

$$\begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \end{bmatrix} = \frac{N}{S} \begin{bmatrix} r_{23} & -r_3 & -r_2 \\ -r_3 & r_{31} & -r_1 \\ -r_2 & -r_1 & r_{12} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix} \quad (22)$$

dove r_0 è la riluttanza che tiene conto delle perdite,

$$s = r_1 r_2 + r_2 r_3 + r_3 r_1 + \frac{r_1 r_2 r_3}{r_0} \quad (23)$$

$$r_{ij} = r_i + r_j + \frac{r_i r_j}{r_0} \quad (24)$$

La riluttanza r_0 è associata alla permeabilità dell'aria, per cui è maggiore delle riluttanze delle colonne.

La resistenza R di smorzamento del modello deve tener conto anche della diversa lunghezza del percorso magnetico di ogni avvolgimento. La resistenza della colonna centrale è maggiore rispetto alle altre a causa del minor volume del materiale coinvolto ($1 > \alpha$):

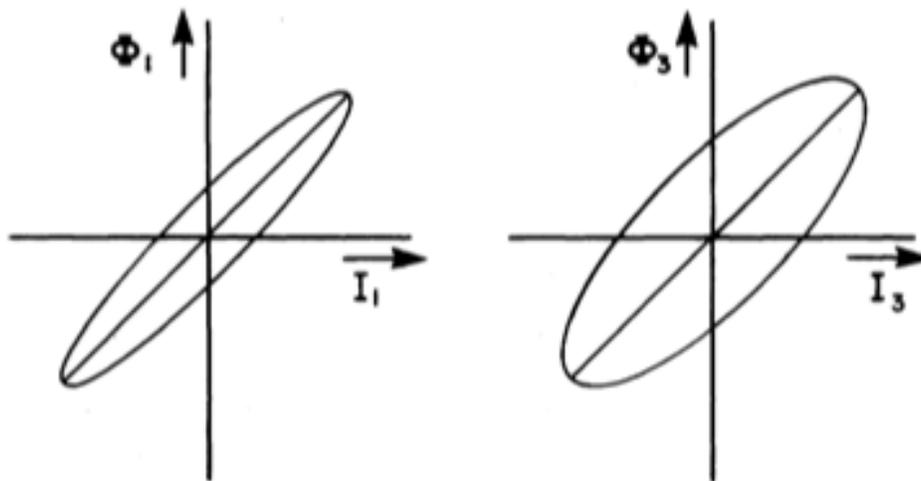
$$R_1 = R_3 = R = \frac{N^2 A}{al} \quad (25)$$

$$R_2 = \frac{R}{\alpha} \quad (26)$$

7.2.2 EFFETTO DELL'ASIMMETRIA DEL NUCLEO

L'asimmetria geometrica del nucleo magnetico porta a un'asimmetria delle densità di flusso e delle correnti negli avvolgimenti. Anche quando le correnti sono bilanciate le densità di flusso sono sbilanciate. Assumendo costante la permeabilità μ e considerando gli effetti dell'isteresi, l'andamenti tipico del flusso in funzione della corrente è di tipo ellittico (Figura 7-2-2-1).

Figura 7-2-2-1 Curve ϕ - I



Applicando delle tensioni bilanciate agli avvolgimenti, il flusso in ogni bobina è sinusoidale e di uguale ampiezza.

Le curve B-I nella Figura 7-2-3-1 sono interessanti. A causa dell'interazione delle correnti negli avvolgimenti le curve B-I sono diverse, in contrasto col trasformatore trifase costituito da tre trasformatori monofase, la differenza in larghezza dipende dall'angolo di sfasamento delle correnti e dalla geometria del nucleo e non dalla non linearità di μ .

Figura 7-2-3-1 L'andamento dell'induzione B in funzione della corrente I nelle tre colonne per $\alpha=1/2$

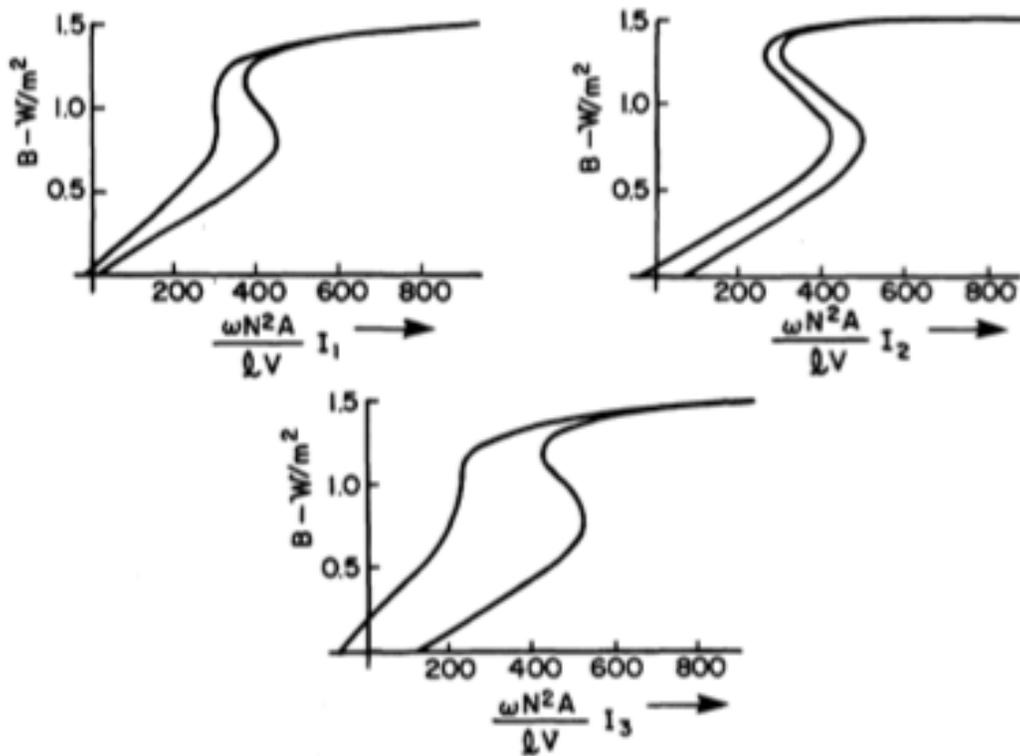
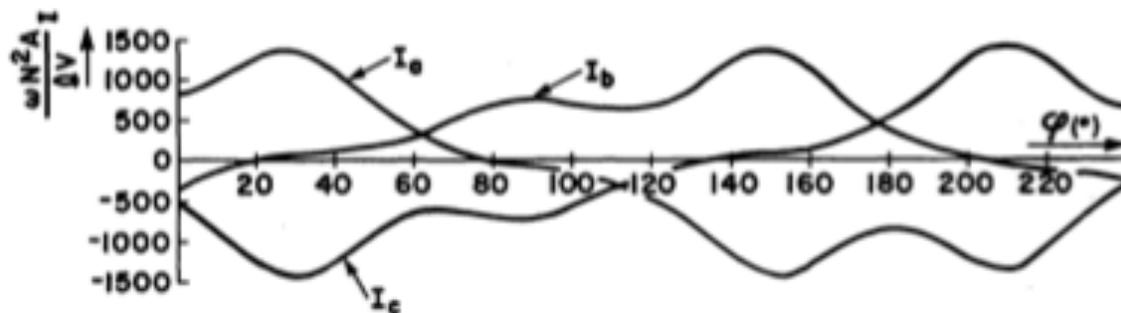


Figura 7-2-3-2 Le correnti magnetizzanti di un trasformatore a 4,16 kV, 1000 kVA



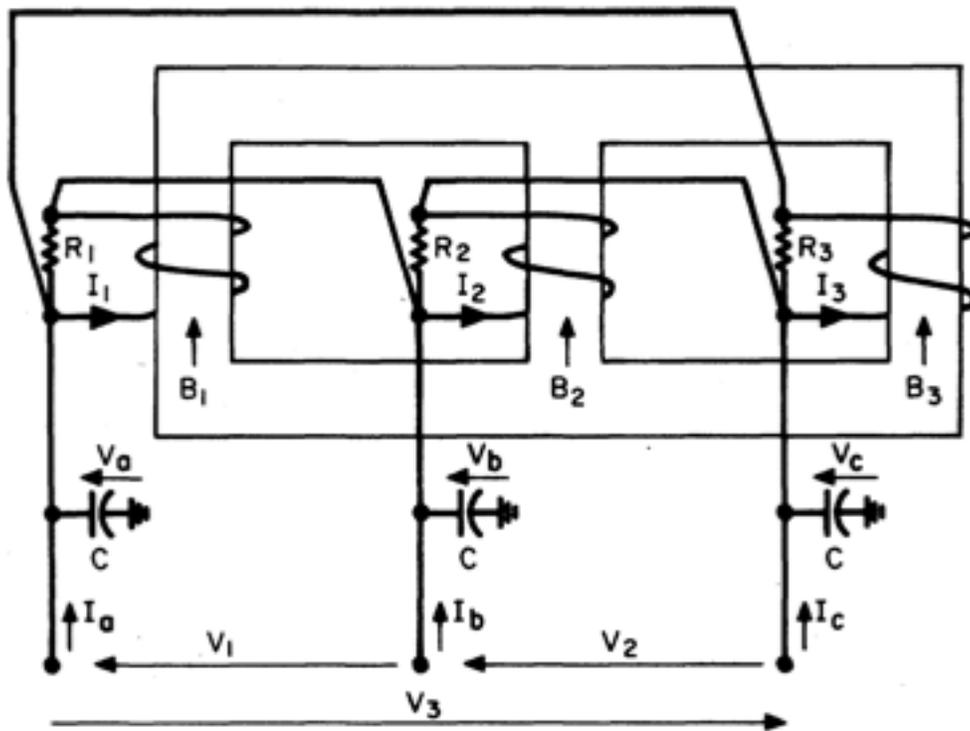
Nella Figura 7-2-3-2 sono indicate le correnti calcolate per una tensione di 4,16 kV, di un trasformatore di 1000 kVA.

L'andamento delle correnti calcolate è in accordo con le misure. E' importante notare la differenza degli angoli elettrici delle correnti.

7.3 EQUAZIONI DIFFERENZIALI - TRONCAMENTO SIMULTANEO DELLE CORRENTI MAGNETIZZANTI

Studiando il troncamento simultaneo delle correnti posso ricavare delle equazioni semplificate per il calcolo delle tensioni transitorie. Deve essere considerato soltanto il trasformatore e le capacità tra il trasformatore e l'interruttore. Si assume che prima del troncamento delle correnti, il trasformatore si trova a regime. Nella Figura 7-3-1 sono indicate le correnti troncate I_a , I_b e I_c .

Figura 7-3-1 Modello del trasformatore a tre colonne



La relazione tensione-corrente:

$$\left(i_a - C \frac{dv_a}{dt}\right) + \left(i_3 + \frac{v_3}{R_3}\right) - \left(i_1 + \frac{v_1}{R_1}\right) = 0 \quad (27)$$

$$\left(i_b - C \frac{dv_b}{dt}\right) + \left(i_1 + \frac{v_1}{R_1}\right) - \left(i_2 + \frac{\alpha v_2}{R_2}\right) = 0 \quad (28)$$

$$\left(i_c - C \frac{dv_c}{dt}\right) + \left(i_2 + \frac{\alpha v_2}{R_2}\right) - \left(i_3 + \frac{v_3}{R_3}\right) = 0 \quad (29)$$

Risolviendo l'equazione (22) ottengo la seguente equazione semplificata:

$$i_k = \frac{A}{N} (r_0 B_0 + r_k B_k) \quad k = 1, 2, 3 \quad (30)$$

dove B_0 è associato al flusso perso,

$$B_0 = B_1 + B_2 + B_3 \quad (31)$$

In termini di densità di flusso e corrente, come fatto per l'equazione (18) l'equazione (22) può essere riscritta nella forma:

$$\begin{aligned} \frac{CN^2 A}{3l} \begin{pmatrix} B_1'' \\ B_2'' \\ B_3'' \end{pmatrix} + a \begin{pmatrix} B_1' \\ B_2' \\ B_3' \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} B_1/\mu_1 \\ B_2/\mu_2 \\ B_3/\mu_3 \end{pmatrix} + (1 - \alpha) \left\{ \frac{a}{3} B_2' \begin{pmatrix} 1 \\ -2 \\ 1 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 0 \\ B_2/\mu_2 \\ 0 \end{pmatrix} \right\} + \frac{A}{l} r_0 B_0 \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} \\ = \frac{N}{3l} \begin{pmatrix} 3i_0 + i_a - i_b \\ 3i_0 + i_b - i_c \\ 3i_0 + i_c - i_a \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (32)$$

L'equazione (32) tiene conto dell'asimmetria dello stato magnetico e che rappresenta la differenza fondamentale rispetto a un trasformatore trifase costituito da tre trasformatori monofase. Usando un programma in grado di risolvere quest'equazione, si possono studiare diversi casi d'interesse.

8. POSSIBILI PRECAUZIONI CONTRO LE SOVRATENSIONI

8.1 INTRODUZIONE

I possibili dispositivi di protezione contro le sovratensioni sono:

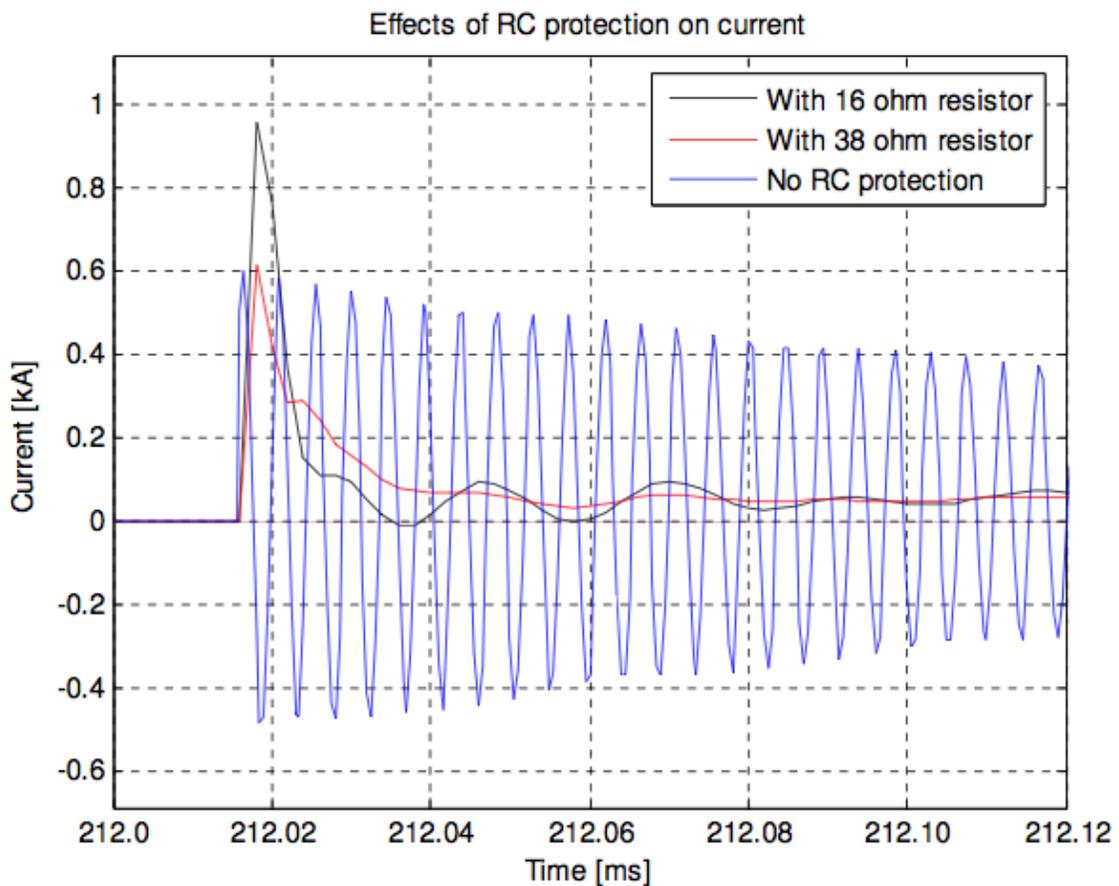
- Circuiti RC;
- Soppressori ZORC;
- Reattori;
- Scaricatori;
- Varistori con o senza gap (SiC, ZnO);
- Interruttore con apertura avanzata dei contatti.

I metodi di protezione da applicare dipendono dalla caratteristica dei transistori e le possibili applicazioni del dispositivo di protezione. Il metodo più diffuso per la protezione è l'utilizzo di scaricatori collegati direttamente ai terminali del trasformatore. Gli scaricatori riducono l'ampiezza delle sovratensioni, ma non limitano $\frac{du}{dt}$ alti. In molti casi i transistori con $\frac{du}{dt}$ alti, non sono influenzati dalla presenza degli scaricatori, mentre l'ampiezza può essere minore del livello di protezione, le oscillazioni ad alta frequenza non sono filtrate dal dispositivo e le onde riflesse non sono eliminate.

I circuiti RC comunemente usati in pratica, sono dei filtri con valori della capacità verso terra tipicamente inferiori o uguali a $0.5 \mu F$ accoppiata ad una resistenza ($R = 5\div 25 \Omega$). Questo tipo di soluzione è caratterizzata da dimensioni e costi applicabile in tutti quei casi di minore importanza, non sono utilizzati nelle applicazioni industriali.

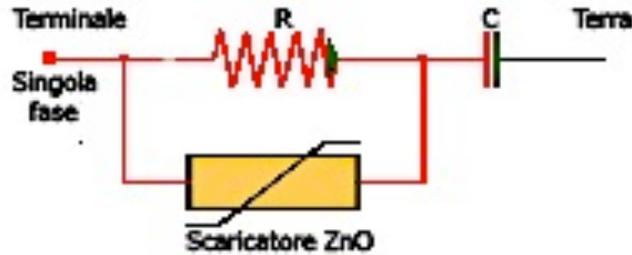
Nella Figura 8-1-1 si può vedere come il circuito RC attenua in modo consistente la corrente ad alta frequenza, però il troncamento virtuale della corrente che provoca più riaccensioni.

Figura 8-1-1 Effetti del circuito RC sulla corrente



Modificando in modo opportuno il circuito RC, si ottiene il soppressore di ZORC, costituito da condensatori, resistori e scaricatori ZnO (Figura 8-1-2).

Figura 8-1-2 Soppressore ZORC



Anche se questa soluzione è molto efficiente, ha le stesse limitazioni del circuito RC.

Una soluzione molto più efficiente è l'apertura avanzata dei contatti dell'interruttore, ma che richiede modifiche significative nell'interruttore e quindi risulta molto costosa l'implementazione.

In più questa soluzione non protegge i trasformatori funzionanti con gli interruttori convenzionali. Un'altra possibilità per limitare i transitori $\frac{du}{dt}$ elevati è l'utilizzo di resistori preinseriti durante le manovre di apertura/chiusura dell'interruttore. Considerando i costi di questa soluzione e la costruzione complessa, non è comunemente usata.

I varistori in ZnO sono estremamente adatti per limitare le sovratensioni grazie alla:

- velocità dell'operazione
- protezione costante
- capacità di assorbire energia
- affidabilità elevata
- possibilità di collegamento serie e parallelo

Nella Tabella 4 sono sintetizzati i valori dell'energia dissipata dagli scaricatori.

Tabella 4 Sommario del valore dell'energia dissipata dagli scaricatori

L'interruttore			Con alti valori della corrente troncata		Con bassi valori della corrente troncata	
U_n (kV)	U_{cov} (kV)	U_d (kV)	L'energia dissipata dovuta a:		L'energia dissipata dovuta a:	
			Corrente virtualmente troncata (J)	Accensioni multiple (J)	Corrente virtualmente troncata (J)	Accensioni multiple (J)
10 – 12	12	29.4	7408	692	4111	386
6 – 7.2	7.2	17.6	4445	416	2467	232
3 – 3.6	3.6	8.8	2222	208	1233	116

8.2 MANOVRE CONTROLLATE

Le manovre controllate sono operazioni dell'interruttore tali da aprire o chiudere i contatti in un predeterminato punto sulla tensione di riferimento o sull'onda della corrente.

Le manovre controllate sono usate per minimizzare lo stress sul sistema di alimentazione ed i suoi componenti. Inoltre lo sforzo a cui è sottoposto l'interruttore durante le manovre può essere ridotto scegliendo l'istante più favorevole dell'apertura/chiusura dei contatti.

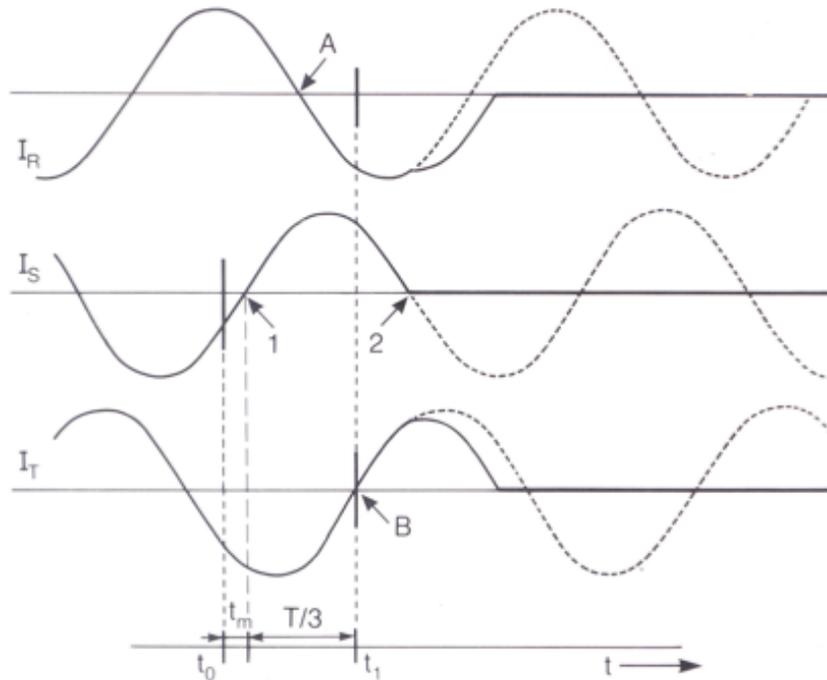
Ci sono delle restrizioni per alcune applicazioni. Non tutti i tipi d'interruttori sono adatti per controllare le manovre, in più bisogna essere accorti a non scegliere questa soluzione in modo non ponderato. L'interruttore richiede il funzionamento con un'accuratezza richiesta per scegliere l'istante per varie applicazioni, è molto importante anche l'affidabilità. Il meccanismo dell'interruttore è il fattore decisivo per rispettare l'accuratezza. I tempi di funzionamento devono essere stabili, con un'elevata capacità di tenere la tensione tra i suoi contatti in condizioni dinamiche, sia durante l'apertura che la chiusura di un circuito. I componenti di controllo come i sensori ed i dispositivi elettronici devono essere implementati nell'interruttore.

Negli interruttori con meccanismi indipendenti per ciascun polo le operazioni di chiusura e apertura possono essere entrambi controllate. Tuttavia, se i poli sono gestiti da un singolo meccanismo, ci sono delle difficoltà nella commutazione, e si può controllare o l'operazione di chiusura o di apertura.

8.3 POLO AD APERTURA AVANZATA

La soluzione di Holec per prevenire il troncamento virtuale della corrente consiste nell'uso del polo ad apertura avanzata negli interruttori a vuoto. Durante l'interruzione della corrente, questo polo apre 8 – 10 ms prima degli altri due (Figura 8-2-1). Nella Figura 8-2-1 il polo S è stato scelto come polo avanzato, la differenza di tempo tra la separazione dei contatti del polo avanzato e degli altri poli, (t_1-t_0) deve essere considerato come tempo minimo di esecuzione per evitare il troncamento virtuale della corrente.

Figura 8-2-1 Principio di funzionamento di un interruttore trifase con polo ad apertura avanzata



I_R , I_S , I_T sono le correnti alla frequenza di rete, delle fasi R, S, T che devono essere interrotte;

I punti 1 e 2 sono gli zeri della corrente nel polo avanzato (fase S);

I punti A e B sono gli zeri della corrente nelle fasi R e T;

T è il periodo alla frequenza di rete;

t_0 è l'istante di apertura del polo avanzato (S);

t_1 è l'istante di apertura negli altri due poli (R, T);

t_m è il tempo minimo dell'arco.

Grazie alla simmetria si può considerare l'apertura del polo avanzato in mezzo periodo.

Nel primo istante, si assume l'interruzione della corrente I_S monofase:

- Quando il polo S è aperto prima di $t = t_0$, l'interruttore a vuoto interromperà sempre definitivamente la corrente nello zero 1. Prima che l'interruzione abbia luogo potrebbero esserci tentativi di apertura seguiti da preaccensioni nell'interruttore a vuoto.
- Quando il polo S apre tra t_0 e lo zero 1, è possibile che l'interruttore a vuoto non interrompa definitivamente la corrente I_S nello zero 1, nonostante i tentativi di apertura. La corrente I_S continuerà a fluire finché viene

interrotta definitivamente nello zero 2 (senza preaccensioni).

Se consideriamo il caso trifase, la separazione dei contatti del polo S in modo ravvicinato allo zero 1, possono accadere preaccensioni in due casi:

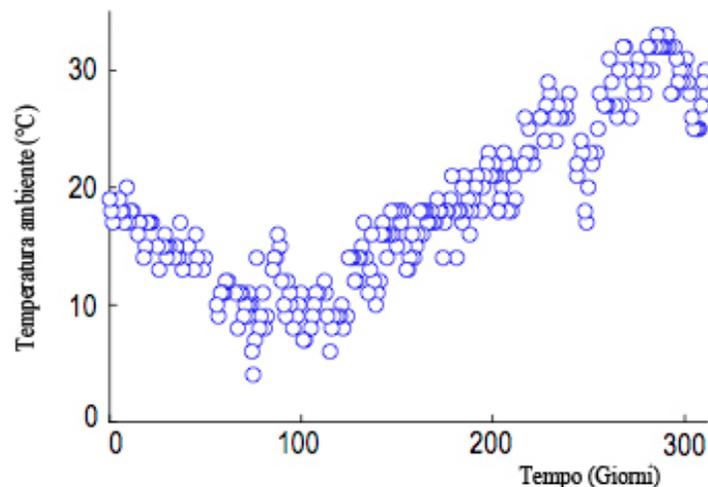
1. I_S è interrotta definitivamente nello zero 1, con possibili preaccensioni. Per gli altri due poli non è critico dove sono aperti, col patto che sono aperti dopo lo zero 1. Il circuito diventa bifase. Entrambi le correnti diminuiscono e non possono dar luogo a correnti elevate troncate virtualmente.
2. I_S è interrotta definitivamente senza preaccensioni nello zero 2 (come indicato dalla linea spessa nella Figura 8-3-1). Questo può accadere solo se i contatti del polo S si separano tra t_0 e lo zero 1. Quando i contatti dei poli R e T aprono prima dello zero A del polo R o lo zero B del polo T, il troncamento virtuale della corrente può ancora accadere come risultato delle preaccensioni nei poli R o T. Bisogna quindi assicurare l'interruzione della corrente definitivamente nel polo S prima che gli archi negli altri poli cominciano ad estinguersi nei loro zeri rispettivamente.

Sintetizzando segue che i poli R e T non devono essere aperti dopo lo zero B. Il tempo tra t_0 e lo zero B è così il tempo minimo che il polo avanzato dovrebbe aprire prima degli altri due in modo di prevenire il troncamento virtuale della corrente. Questo tempo è quindi la somma del tempo minimo dell'arco t_m ed un terzo del periodo alla frequenza di rete.

8.4 L'ERRORE OPERATIVO DEL INTERRUTTORE CONTROLLATO

L'efficienza operativa di un interruttore controllato varia in funzione delle condizioni operative. La temperatura e la pressione dell'ambiente possono variare durante l'arco della giornata e possono influire sull'accuratezza dell'interruttore controllato.

Figura 8-2-2-1 L'andamento della temperatura ambiente durante le operazioni di chiusura/apertura dell'interruttore controllato



Nella Figura 8-2-2-1 è indicato un possibile andamento della temperatura dell'ambiente durante le operazioni di chiusura, dove la pressione del sistema idraulico è compresa tra 31.5 e 32.5 MPa, che sono valori normali di funzionamento, e dove la tensione di controllo è rimasta ad un valore prefissato. Nelle Figure 8-2-2-2 e 8-2-2-3 si vedono rispettivamente le variazioni dei tempi di chiusura e apertura e gli errori operativi durante le operazioni di chiusura ed apertura. Si nota che i tempi di chiusura ed apertura variano con il cambiare della temperatura dell'ambiente.

Figura 8-2-2-2 Variazione del tempo di chiusura e deviazione dal valore di riferimento

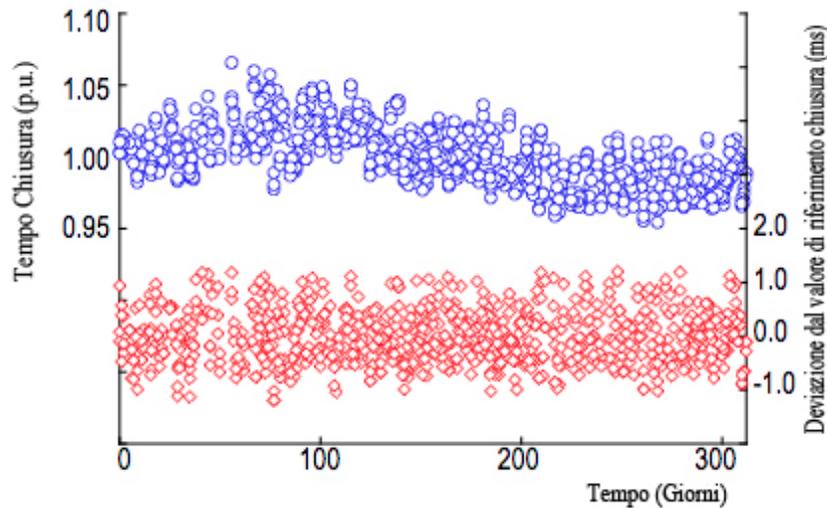
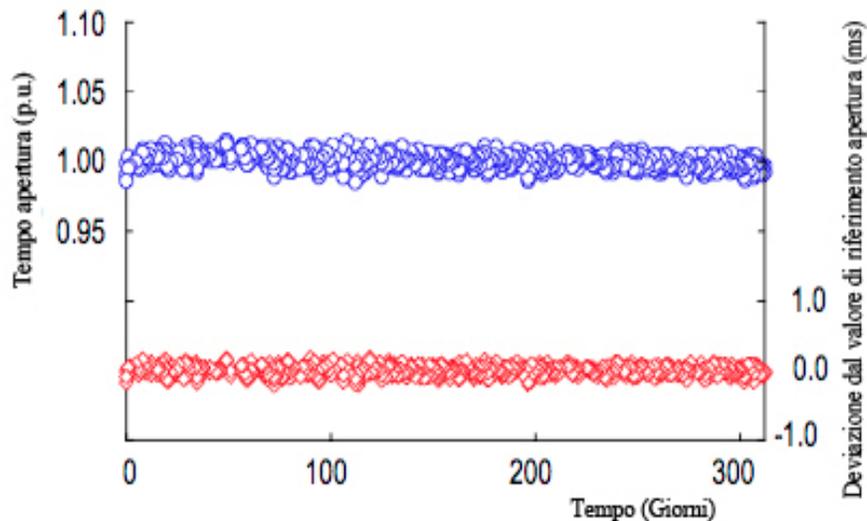


Figura 8-2-2-3 Variazione del tempo di apertura e deviazione dal valore di riferimento



Si nota uno scostamento medio di ± 1.2 ms dal valore di riferimento durante le operazioni di chiusura e di ± 0.2 ms durante le operazioni di apertura.

8.5 UNA NUOVA SOLUZIONE CONTRO LE TENSIONI TRANSITORIE VELOCI

Si è visto che le tensioni transitorie dipendono dal valore dell'impedenza equivalente della sorgente delle sovratensioni. A causa della piccola impedenza dei cavi di alimentazione si ha a che fare in caso di manovre sull'interruttore con sovratensioni molto più elevate rispetto nel caso in cui l'impedenza equivalente della sorgente è maggiore. L'ampiezza e la frequenza delle tensioni transitorie è risultato anche di terminazioni dei cavi non adeguati.

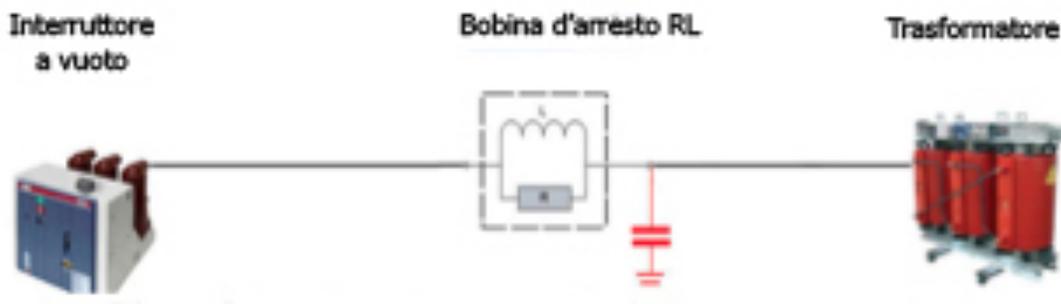
Una possibile soluzione è l'utilizzo di una bobina d'arresto RL serie collegata prima del trasformatore, che incrementa l'impedenza della sorgente delle sovratensioni (Figura 8-3-1). Il filtro serie è praticato in diverse applicazioni in bassa tensione, invece in media tensione la progettazione è più complicata a causa dell'isolamento più elevato necessario per le singole fasi.

La bobina d'arresto RL progettata per una specifica frequenza caratteristica può ridurre significativamente il tempo di crescita del fronte d'onda, e nello stesso tempo, minimizzare l'influenza sulla strumentazione in normali condizioni di funzionamento. Questo significa che la bobina d'arresto deve essere chiusa nello zero a 50/60 Hz. In alcune applicazioni può essere utile utilizzare la bobina d'arresto RL insieme ad una piccola capacità collegata tra fase e terra.

L'uso di un'appropriata bobina d'arresto RL permette di:

- Limitare i valori di $\frac{du}{dt}$ ai terminali del trasformatore (impiego della bobina RL ed eventualmente la capacità C);
- Limitare le sovratensioni transitorie (il filtraggio delle alte frequenze da parte della bobina d'arresto ed eventualmente la capacità C);
- Eliminare le riflessioni delle onde nel cavo e le oscillazioni ad alta frequenza (quando $Z_{bobina} = Z_S$);
- Eliminare o ridurre il numero delle preaccensioni (richiede la capacità C in modo di ridurre la frequenza delle oscillazioni).

Figura 8-3-1 L'uso della bobina d'arresto RL per la protezione di un trasformatore



9. CONSIDERAZIONI TECNICO-ECONOMICI

Come si è visto esistono soluzioni per la protezione dei trasformatori in seguito a guasti di varia natura. Si possono utilizzare dispositivi di protezione che già esistono o nuovi concetti usati in altre applicazioni ma attuabili anche nel campo delle medie tensioni. Un aspetto importante cui prestare attenzione è il costo complessivo dei dispositivi di protezione, d'installazione e di mantenimento. Non tutte le soluzioni sono adeguate per vari tipi d'impianti, quindi le domande che spesso si pongono i progettisti, sono: come scegliere un'appropriata protezione? Come progettare l'impianto complessivo per evitare o ridurre le sovratensioni negli impianti? Di quanto incrementare il livello d'isolamento di un trasformatore?

E' necessario lo sviluppo di un criterio per determinare l'esistenza di certi transitori e la scelta di un modello virtuale del trasformatore.

10. ALCUNI MALINTESI GENERALI

Alcuni malintesi continuano ad esistere, nonostante siano logiche, che però nella pratica non sono generalmente accettati. Spesso la regione delle alte frequenze viene dimenticata nel sistema elettrico. La risonanza è inevitabile e potenzialmente pericolosa, come dimostrano i vari casi di trasformatori in MT e AT danneggiati a causa di questo fenomeno. La risonanza può essere evitata ad una specifica frequenza, progettando nella maniera accorta, però comunque in un ristretto campo. Molti credono che i trasformatori siano in grado di sostenere qualsiasi tipo di sovratensione, basta che sia minore della tensione d'impulso, in realtà dipendono anche dalla forma d'onda.

11. CONCLUSIONI

La combinazione di eventi e parametri del sistema elettrico può portare a fenomeni transitori veloci che causano danni alla strumentazione elettrica. I dispositivi più sensibili a questi fenomeni sono soprattutto gli interruttori, i trasformatori e i motori. Le sovratensioni e le riaccensioni multiple s'incontrano spesso sui trasformatori a vuoto in MT.

Gli studi confermano che l'interazione complessa dei vari componenti del sistema elettrico sottoposti a transitori veloci sono responsabili di guasti sui trasformatori di distribuzione. I fenomeni sono conosciuti e accettati, però la loro azione combinata è ammessa solo da poche persone. Sono stati riscontrati molti casi simili in cui componenti progettati bene e che rispettano standard qualitativi, come ad esempio trasformatori in olio, in specifiche condizioni di funzionamento sono stati soggetti a guasti inspiegabili.

I test standard odierni non coprono specifici transitori veloci, è necessario quindi indicare una linea guida per la progettazione e la scelta ottimizzata di vari componenti del sistema elettrico in modo di evitare o di ridurre questi fenomeni transitori dannosi. I dispositivi di protezione devono essere scelti in modo opportuno e bisogna valutare anche il lato economico. Sono stati fatti sforzi promettenti da parte di "IEEE working group on Switching Transients" per studiare i fenomeni descritti e trovare soluzioni ai problemi.

BIBLIOGRAFIA E REFERENZE

- [1] Insulating and Switching Media in Medium Voltage Distribution and Medium Voltage Motor Control, Wim.M.M. Menheere, Gerard.C. Schoonenberg, Jan Verstraten, Rudy Vervaet.
- [2] Detailed Study of Fast Transient Phenomena in Transformers and Substations Leading to an Improved System Design, T. Van Craenenbroeck, H. De Herdt, J. De Ceuster, J.P. Marly, D.Van Dommelen, R. Belmans.
- [3] Switching Voltages in M.V. Networks, G.C. Schoonenberg, W.M.M. Menheere.
- [4] Analysis of Voltage Distribution in Transformer Windings During Circuit Breaker Prestrike M. Popov, R.P.P. Smeets, L. van der Sluis, H. de Herdt, J. Declercq.
- [5] Failure Analysis of Dry-Type Power Transformer, Dev Paul.
- [6] Controlled Switching in High Voltage Power Networks, Martin H.B. de Grijp, Chapter 2: Controlled Switching, p21-22.
- [7] The Influence of a Vacuum Generator Circuit Breaker on the Parameters of Switching Overvoltages Generated during Load Shedding, S. Hasanzadeh, K. Niayesh, H. Mohseni.
- [8] Protecting distribution transformers against Very Fast Transients due to switching operation, D. Smugala, W. Piasecki, M. Ostrogorska, M. Fulczyk, M. Florkowski, P. Klys.
- [9] Re-ignition Surge and High-Frequency Arc Extinction Phenomena at 550-kV Shunt Reactor Current Interruption, Shigemitsu Okabe, Masanori Koto, Tadashi Koshizuka, Takeshi Shinkai, Susumu Nishiwaki, Nobuyuki Miyake, Tetsuya Nakamoto, Toshiyuki Saida.
- [10] Capacitor Switching and Capacitor Switching Devices, Thomas P. Speas.
- [11] Lezioni di Materiali per L'Ingegneria Elettrica, Gabrielle Marchesi, § 11.4 Il vuoto come isolante, p175-178.
- [12] Vacuum Switching, Cahier Technique no.198, Philippe PICOT.
- [13] Field Experience with Controlled Switching System Applied in Reactor and Capacitor Switching, Haruhiko Kohyama, Tomohito Mori, Nobuhiro Torii.
- [14] Vacuum Circuit Breaker Application and Surge Protection, John F. Perkins, Capitolo 13, p491-505.
- [15] Interruption of Small Inductive Currents, Convener S. Berneryd, D. Boyle, E. Colombo, R.H. Harner, W.M.C. van den Heuvel, M. Karttunen, B.C. Papadias, A.T. Roguski, N.V. Shilin, D.K. Sweeting, S. Tominaga, Capitolo 2, §2.6.

[16] Chopping of Transformer Magnetizing Currents, S. Ihara, J. Panek, E.J. Tuohy, p1106-1110.