

COMPENSAZIONE DELLE PERDITE

INDICE

	pag.
1. SCOPO	3
2. DEFINIZIONI.....	3
3. COMPENSAZIONE DELLE PERDITE	4
3.1.IPOTESI.....	5
3.2.METODO DEL BILANCIO	6
3.3.SINTESI DEI DATI	11
4. ESEMPIO DI APPLICAZIONE DEL METODO	12
4.1.DATI.....	12
4.2.SCELTA DELLE CONDIZIONI DI RIFERIMENTO	13
4.3.DETERMINAZIONE DELLE PERDITE NELLE CONDIZIONI DI RIFERIMENTO ..	13
4.4.DETERMINAZIONE DEI COEFFICIENTI DI PERDITA	16

1. SCOPO

In questo documento si descrive il metodo da utilizzare in locale¹ per effettuare la compensazione delle perdite di potenza attiva e reattiva per il sistema di misura dell'energia elettrica del Gestore.

Il metodo deve essere applicato quando:

- si è installata una AdM di misura in un punto di misura diverso dal punto di scambio corrispondente. nei casi in cui la misura viene effettuata in punti interni ad impianti elettrici di produzione, di consumo e di reti senza obbligo di connessione di terzi diversi dai punti di immissione, di prelievo o di interconnessione.
- si vogliono confrontare le misure ottenute da un punto di misura principale con quelle ottenute da un punto di misura di riscontro, installato in un punto differente.

Il responsabile della misura registrata dall'AdM può proporre metodi alternativi di compensazione delle perdite, fornendo un'adeguata documentazione e dimostrando:

- che il metodo proposto è equivalente a quello indicato dal Gestore nel presente documento;
- che può essere eseguito in locale dal contatore dell'AdM considerata;
- che l'errore percentuale delle misure compensate ottenute applicando il metodo alternativo, rispetto alle misure ottenute applicando il metodo proposto dal Gestore, è inferiore allo 0.01% per una corrente compresa tra il 30% ed il 100% della corrente nominale del TA e alla tensione nominale del TV (il confronto tra i metodi di compensazione può essere effettuato su base teorica).

In ogni caso il Gestore si riserva di accettare o rifiutare tali proposte a seguito di un proprio esame tecnico.

2. DEFINIZIONI

Punto di misura: è il punto fisico della rete dove sono installati i trasformatori di misura del complesso di misura.

Punto di scambio virtuale: è il punto fisico della rete in cui non è installata alcuna Adm e pertanto vengono stimate le misure di energia tramite il metodo di compensazione delle perdite.

¹ Questo metodo è implementato localmente dal contatore dell'AdM

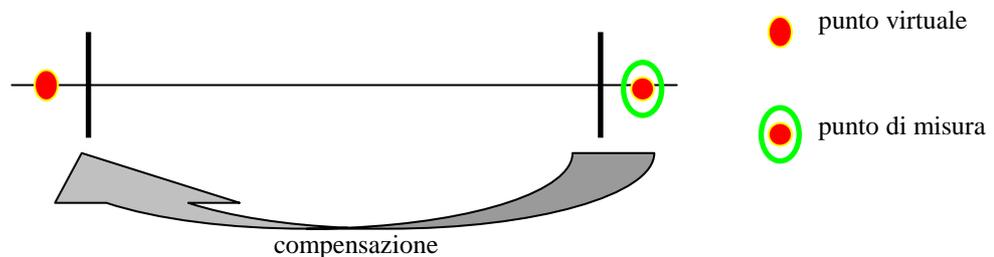
3. COMPENSAZIONE DELLE PERDITE

La compensazione delle perdite consente di ottenere i dati di misura di interesse del Gestore a partire da una AdM installata in un punto differente dal punto di misura. Tale elaborazione è effettuata sommando o sottraendo dai valori misurati dall'AdM nel punto di misura le perdite dovute agli elementi di rete interposti tra il punto di misura e quello virtuale di scambio.

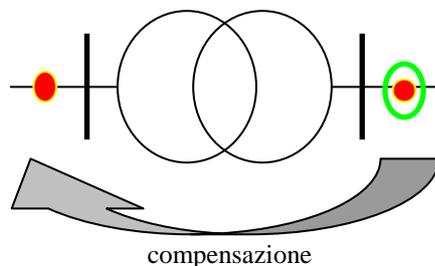
I valori delle perdite sono calcolati tenendo conto delle reali condizioni di funzionamento degli elementi interposti tra il punto di misura e il Punto di scambio virtuale.

Gli elementi di rete considerati sono i seguenti:

1. linee in antenna



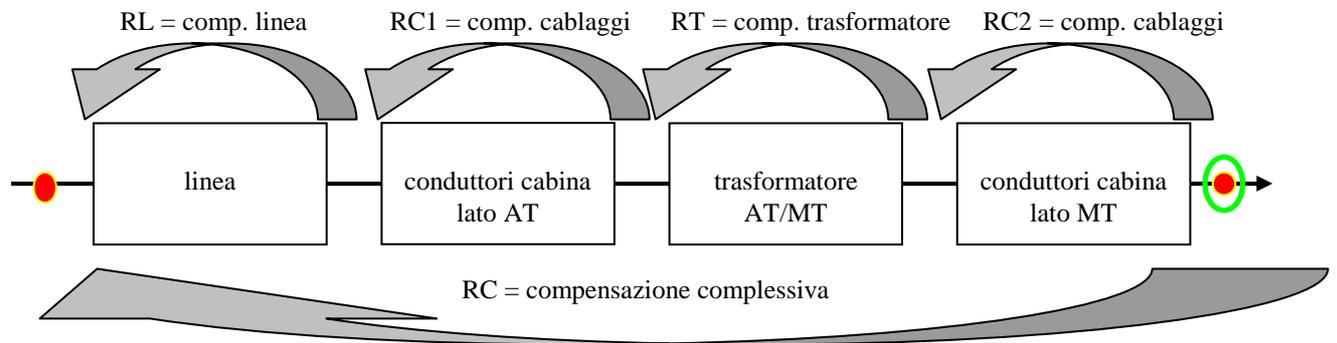
2. trasformatori di potenza



3. conduttori delle stazioni o delle cabine

In particolare, per quanto riguarda i conduttori delle cabine o delle stazioni, questi potranno essere rappresentati come delle linee molto corte; pertanto la loro impedenza sarà in genere trascurata oppure considerata come un'impedenza addizionale da conglobare in serie alla resistenza del trasformatore o della linea connessi direttamente a tale cabina o stazione.

Definito il metodo da utilizzare per la compensazione delle perdite per ciascun degli elementi di rete sopra riportati, nel caso di più elementi collegati in cascata, sarà sufficiente applicare lo stesso metodo di compensazione all'insieme degli elementi connessi; un esempio è fornito dal successivo schema:



L'analisi degli elementi interposti (linee in antenna, trasformatori di potenza e conduttori delle stazioni o cabine) tra punto di misura e punto di scambio comprende un'ampia casistica di casi – studio derivante da tutte le loro possibili combinazioni.

3.1. Ipotesi

Il metodo di compensazione delle perdite, specificato nel presente documento, deve essere eseguito in locale dall'AdM, cioè dal contatore.

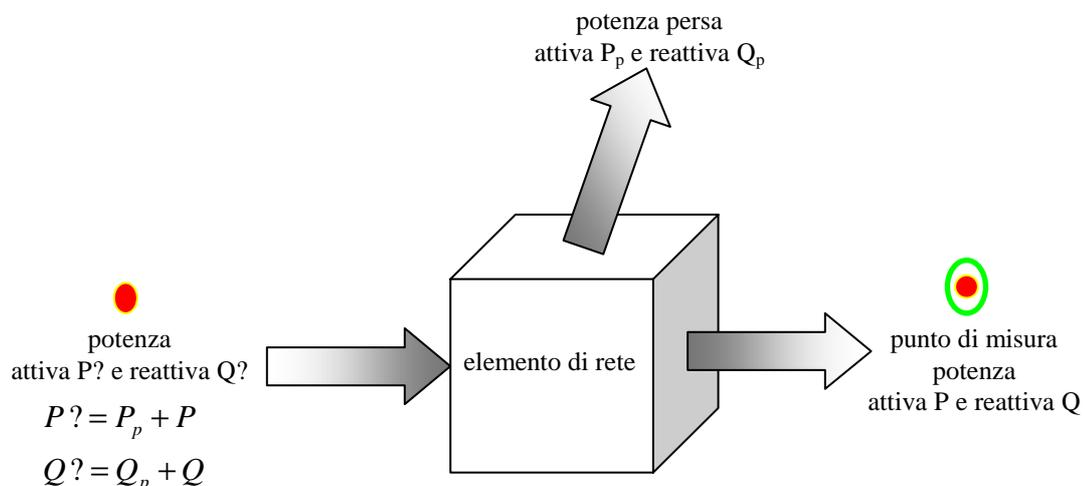
Il metodo si basa sulle seguenti ipotesi:

- rete in regime alternato sinusoidale puro;
- rete a regime;
- rete è lineare;
- sistema trifase simmetrico nelle tensioni ed equilibrato nelle correnti;
- proporzionalità delle perdite di ogni elemento con le potenze delle grandezze elettriche di riferimento (come indicato nelle tabelle del successivo paragrafo 3.2).

Inoltre, per semplicità, è possibile trascurare i mutui accoppiamenti induttivi e/o capacitivi tra le varie fasi.

3.2. Metodo del bilancio

Il metodo del bilancio si basa sul principio di conservazione, valido sia per le potenze attive sia per quelle reattive in condizioni di regime alternato sinusoidale. In particolare l'approccio è a "scatola chiusa" per cui ogni elemento di rete viene racchiuso in una superficie chiusa attraverso la quale gli scambi di potenza attiva e di potenza reattiva devono avere complessivamente un bilancio nullo in ogni condizione di funzionamento; tale principio è schematizzato nella figura seguente:



Affinchè tale metodo possa essere applicato è necessario conoscere per qualsiasi condizione di funzionamento::

- le potenze P e Q nel punto di misura; esse sono misurate dall'Adm nel punto di misura e sono quindi certamente note per ogni condizione di funzionamento;
- le perdite P_p e Q_p ; esse vengono determinate in una condizione di funzionamento assunta come condizione di riferimento (in genere coincidente con il funzionamento nominale) e quindi riportate a condizioni di funzionamento diverse mediante una proporzione.

La determinazione delle perdite viene fatta considerando singolarmente e separatamente i seguenti elementi circuitali:

* *Trasformatore di potenza:*

Per il trasformatore di potenza si considerano le perdite nel nucleo (o nel ferro), dette anche perdite a vuoto, e le perdite nel rame, dette anche perdite a carico.

In particolare le perdite a vuoto e a carico risultano proporzionali ai seguenti fattori: :

Tipo di perdite	Componente	Causa principale		Proporzionali a
perdite a vuoto (o perdite nel ferro)	attiva	conduttanza di magnetizzazione	correnti parassite isteresi magnetica	E^2 tensione di fase applicata
	reattiva	susceptanza di magnetizzazione		E^4 tensione di fase applicata
perdite a carico (o perdite nel rame)	attiva	resistenza degli avvolgimenti		I^2 corrente di linea
	reattiva	induttanza di dispersione		

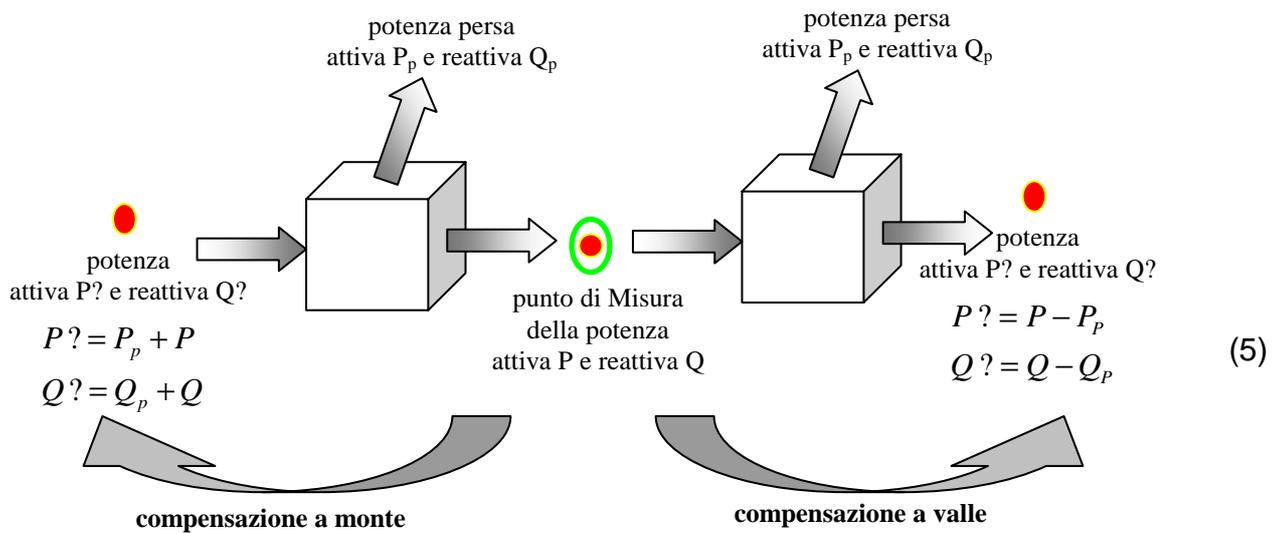
* *Linea:*

Per la linea di lunghezza L si considerano le perdite dovute ai parametri trasversali ed eventualmente longitudinali. In particolare vale quanto riportato nella seguente tabella:

Tipo di parametro	Componente	Causa	Proporzionali a
trasversale	attive	resistenza di linea	I^2 corrente di linea
	reattive	induttanza di linea	
longitudinale	attive	conduttanza di linea	E^2 tensione tra fase e terra
	reattive	capacità di linea	

L'idea alla base del metodo per bilancio è quella di determinare le perdite P_p e Q_p in una determinata condizione di riferimento e di utilizzare tali valori in equazioni che forniscano P e Q in funzione delle condizioni di funzionamento, ovvero in funzione dei valori assunti dalla tensione e dalla corrente.

Ovviamente, nell'effettuare il bilancio delle potenze, le perdite così calcolate dovranno essere sommate o sottratte a seconda del verso della compensazione applicata, come illustrato nella figura seguente:



La determinazione delle perdite in funzione delle variazioni della tensione e della corrente, mediante le equazioni del metodo ai bilanci, non tiene conto delle variazioni di alcune grandezze di influenza rispetto ai valori delle stesse assunti nelle condizioni di riferimento (si consideri ad esempio la temperatura degli avvolgimenti e del nucleo del trasformatore). Perché tale approssimazione sia accettabile si devono scegliere come condizioni di riferimento quelle di funzionamento nominale dell'elemento di rete considerato.

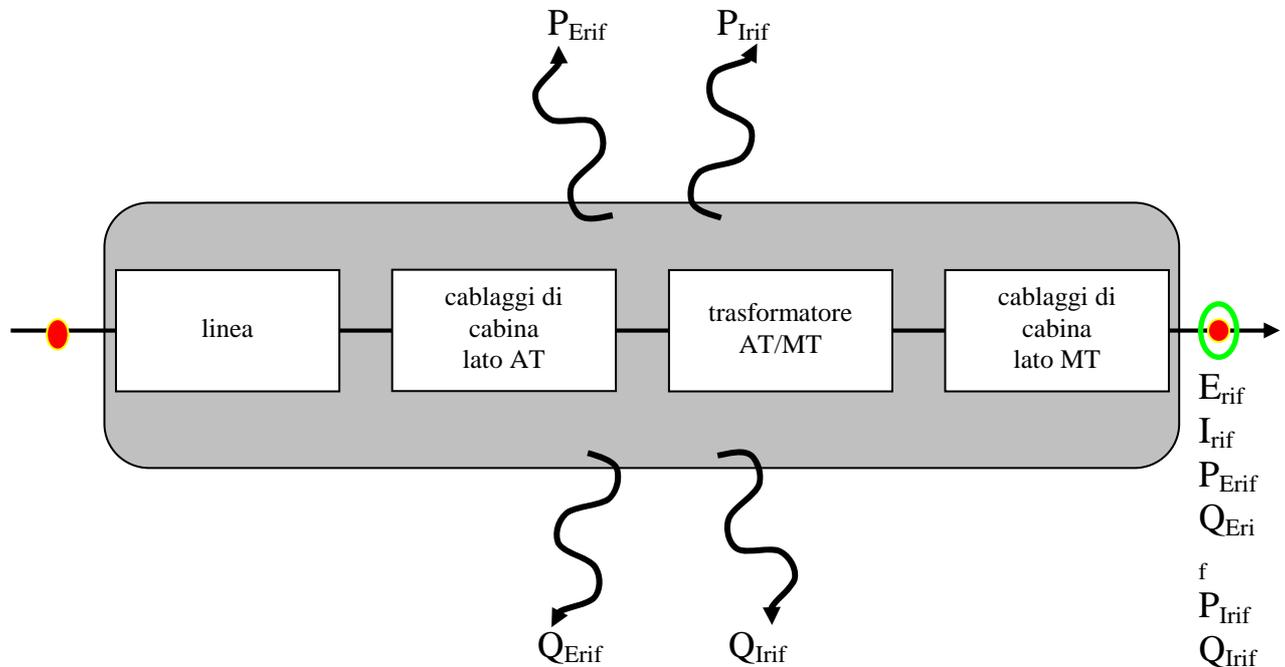
Sotto le precedenti ipotesi, il metodo per bilancio si implementa raggruppando tutte le perdite che dipendono da una stessa grandezza elettrica (tensione E di fase o corrente I) e determinando, per ognuno di tali raggruppamenti, il loro valore nelle condizioni di riferimento:

- tensione di fase di riferimento E_{rif} ;
- corrente di linea di riferimento I_{rif} ;
- potenza attiva misurata in condizioni di riferimento P_{rif} ;
- potenza reattiva misurata in condizioni di riferimento Q_{rif} ;

La tabella di seguito riportata, raggruppa i vari tipi di perdite e riporta la nomenclatura con la quale si conviene di indicare la somma algebrica di ognuna di esse:

<i>Potenza</i>	<i>Tipo di perdite</i>		<i>Elemento di rete</i>	<i>Proporzionali a</i>	<i>Nome</i>
attiva	perdite a vuoto (o perdite nel ferro) conduttanza di magnetizzazione	per correnti parassite	trasformatore	E^2 tensione di fase applicata	P_{Erif}
		per isteresi magnetica	trasformatore		
	perdite a carico (o perdite nel rame) resistenza degli avvolgimenti		trasformatore	I^2 corrente di linea	P_{Irf}
	resistenza di linea		linea		
resistenza dei cablaggi di cabina o di stazione		cablaggi di cabina o di stazione			
reattiva	perdite a vuoto (o perdite nel ferro) susceptanza di magnetizzazione		trasformatore	E^4 tensione di fase applicata	Q_{Erif}
	perdite a carico (o perdite nel rame) induttanza di dispersione degli avvolgimenti		trasformatore	I^2 corrente di linea	Q_{Irf}
	induttanza di linea		linea		
	induttanza dei cablaggi di cabina o di stazione		cablaggi di cabina o di stazione		

La figura seguente illustra graficamente il significato di quanto sopra descritto:



Le quattro perdite P_{Erif} , P_{Irif} , Q_{Erif} , Q_{Irif} , determinate nelle condizioni di riferimento, costituiscono i quattro *Coefficienti di Perdita*. Per i contatori che implementano tale algoritmo, questi coefficienti sono in genere i parametri che devono essere forniti affinché si possa effettuare la compensazione delle perdite.

Il calcolo di tali parametri viene svolto a priori ed una volta sola.

A partire dai quattro coefficienti di perdita e ipotizzando una proporzionalità diretta con le grandezze elettriche (tensioni e correnti) è possibile calcolare i valori percentuali delle potenze in altre condizioni di funzionamento:

$$P_E = \frac{E^2}{E_{rif}^2} \cdot P_{Erif}$$

$$P_I = \frac{I^2}{I_{rif}^2} \cdot P_{Irif}$$

$$Q_E = \frac{E^4}{E_{rif}^4} \cdot Q_{Erif}$$

$$Q_I = \frac{I^2}{I_{rif}^2} \cdot Q_{Irif}$$

(6)

Mediante le (6) è possibile ricostruire la potenza attiva e reattiva persa in una generica condizione di funzionamento (entro i limiti di validità del precedente modello):

$$P_p = \left(\frac{E^2}{E^2_{rif}} \cdot P_{Erif} + \frac{I^2}{I^2_{rif}} \cdot P_{Irif} \right) \quad (7)$$

$$Q_p = \left(\frac{E^4}{E^4_{rif}} \cdot Q_{Erif} + \frac{I^2}{I^2_{rif}} \cdot Q_{Irif} \right)$$

Sostituendo le precedenti relazioni (7) nelle (5) si ottengono le equazioni fondamentali del metodo del bilancio, per i due possibili versi di compensazione:

compensazione a monte

$$P? = \left(\frac{E^2}{E^2_{rif}} \cdot P_{Erif} + \frac{I^2}{I^2_{rif}} \cdot P_{Irif} \right) + P \quad (8)$$

$$Q? = \left(\frac{E^4}{E^4_{rif}} \cdot Q_{Erif} + \frac{I^2}{I^2_{rif}} \cdot Q_{Irif} \right) + Q$$

compensazione a valle

$$P? = P - \left(\frac{E^2}{E^2_{rif}} \cdot P_{Erif} + \frac{I^2}{I^2_{rif}} \cdot P_{Irif} \right) \quad (9)$$

$$Q? = Q - \left(\frac{E^4}{E^4_{rif}} \cdot Q_{Erif} + \frac{I^2}{I^2_{rif}} \cdot Q_{Irif} \right)$$

Affinchè il contatore possa effettuare la compensazione delle perdite come specificato, esso deve poter essere programmato per svolgere le precedenti equazioni e disporre di capacità di elaborazione sufficiente.

3.3. Sintesi dei dati

Per poter applicare le precedenti equazioni, occorre:

- determinare a priori e una volta soltanto i quattro coefficienti di perdita, P_{Erif} , P_{Irif} , Q_{Erif} , Q_{Irif} nelle condizioni di riferimento una volta fissati i valori di E_{rif} e I_{rif} ;
- determinare la potenza attiva P e la potenza reattiva Q , la tensione di fase E e la corrente di linea I nel punto di misura.

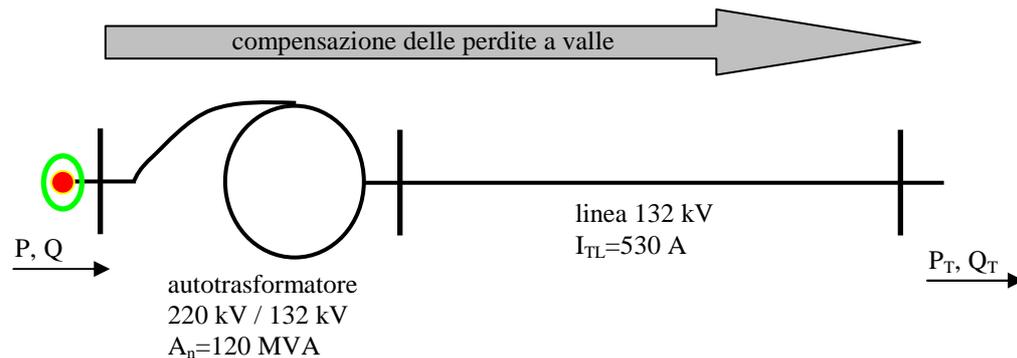
Nel caso di modalità di inserzione con TV tra fase e terra, la tensione di fase E è misurata direttamente dal contatore; nel caso di inserzione con TV tra fase e fase, la tensione di fase E è pari a quella misurata dal contatore divisa per la $\sqrt{3}$.

I coefficienti di perdita sono i dati che devono essere forniti al contatore affinché possa effettuare la compensazione delle perdite; tali coefficienti possono essere ricavati:

- mediante misure sperimentali;
- sulla base delle informazioni fornite dai costruttori;
- mediante opportuni calcoli.

4. ESEMPIO DI APPLICAZIONE DEL METODO

Si applica il metodo di compensazione al caso riportato nella figura seguente.



Il punto di misura è installato a monte dell'autotrasformatore sul lato di alta tensione. La compensazione delle perdite consente di esprimere le potenze P_T e Q_T in funzione delle potenze P , Q e della tensione e corrente misurate nel punto di misura.

4.1. Dati

Dati del trasformatore

Potenza apparente nominale $A_n = 120 \cdot 10^6 \text{ VA}$

Tensione concatenata primaria nominale $V_{1n} = 220 \cdot 10^3 \text{ V}$

Tensione concatenata secondaria nominale $V_{2n} = 132 \cdot 10^3 \text{ V}$

Rapporto nominale del trasformatore $K = \frac{V_{1n}}{V_{2n}} \quad K = 1,667$

Perdite nel ferro $P_o = 27 \cdot 10^3 \text{ W}$

Perdite nel rame a 75 °C $P_{cu} = 2,16 \cdot 10^5 \text{ W}$

Tensione di corto circuito percentuale $V_{cc} \% = 9,93\%$

Corrente a vuoto percentuale $i_o \% = 0,118\%$

Dati della linea aerea (per fase)

Resistenza chilometrica corretta $r_L = 0,1332 \frac{\text{ohm}}{\text{km}}$

Reattanza chilometrica corretta $x_L = 0,4041 \frac{\text{ohm}}{\text{km}}$

Conduttanza chilometrica corretta $g_L = 0 \frac{\text{siemens}}{\text{km}}$

Suscettanza chilometrica corretta $b_L = 3,142 \cdot 10^{-6} \frac{\text{siemens}}{\text{km}}$

Lunghezza della linea $l = 25 \text{ km}$

Corrente di limite termico $I_{LT} = 530 \text{ A}$

Dati dei conduttori della stazione (per fase)

Resistenza chilometrica, riferita al primario del trasformatore $r_s = 0,005 \frac{\text{ohm}}{\text{km}}$

Reattanza chilometrica, riferita al primario del trasformatore $x_s = 0,09 \frac{\text{ohm}}{\text{km}}$

Lunghezza dei conduttori $l_s = 50 \text{ m}$

4.2. Scelta delle condizioni di riferimento

Per la determinazione dei coefficienti di perdita si assumono le seguenti condizioni di riferimento:

- potenza apparente di riferimento equivalente a quella del trasformatore;
- tensione concatenata di riferimento equivalente a quella del trasformatore per il lato considerato (alta o bassa tensione).

4.3. Determinazione delle perdite nelle condizioni di riferimento

Perdite del trasformatore

- Prova in corto circuito

Perdite in VA totali del trasformatore:

$$A_{cc} = V_{cc} \% \cdot A_n$$

$$A_{cc} = 1,192 \cdot 10^7 \text{ VA}$$

Potenza attiva e reattiva perse dal trasformatore:

$$P_{cc} = P_{cu}$$

$$P_{cc} = 2,16 \cdot 10^5 \text{ W}$$

$$Q_{cc} = \sqrt{A_{cc}^2 - P_{cc}^2}$$

$$Q_{cc} = 1,191 \cdot 10^7 \cdot \text{var}$$

- Prova a vuoto

Perdite in VA totali del trasformatore:

$$A_o = i_o \% \cdot A_n$$

$$A_o = 1,416 \cdot 10^5 \text{ VA}$$

Potenza attiva e reattiva perse dal trasformatore:

$$P_o = 2,7 \cdot 10^4 \text{ W}$$

$$Q_o = \sqrt{A_o^2 - P_o^2}$$

$$Q_o = 1,39 \cdot 10^5 \cdot \text{var}$$

Perdite della linea di trasmissione

- Determinazione dei parametri

$$R_L = r_L \cdot l \quad R_L = 3,33 \text{ ohm}$$

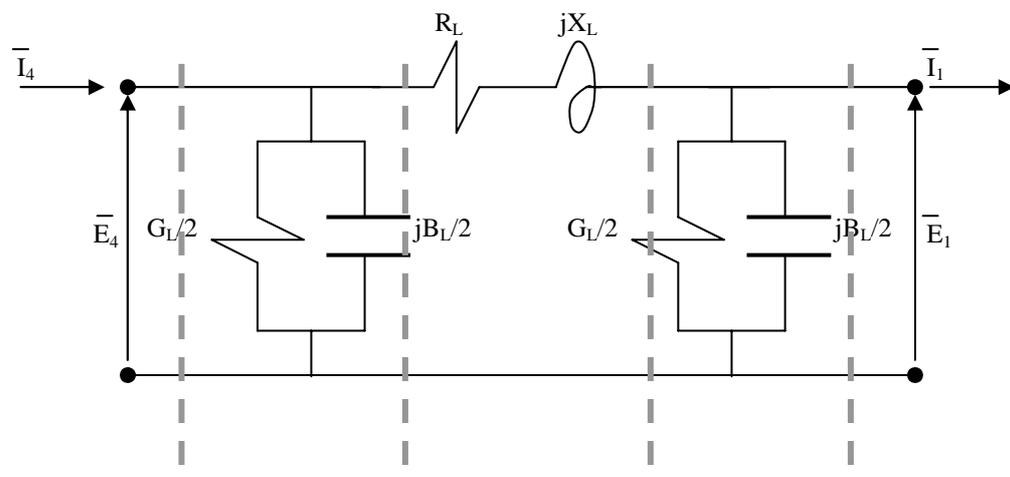
$$X_L = x_L \cdot l \quad X_L = 10,103 \text{ ohm}$$

$$G_L = g_L \cdot l \quad G_L = 0 \text{ siemens}$$

$$B_L = b_L \cdot l \quad B_L = 7,854 \cdot 10^{-5} \text{ siemens}$$

- Calcolo delle perdite

Si assume il seguente circuito equivalente monofase a π che schematizza la linea:



In corrispondenza della sezione 4 si assumono, come precedentemente stabilito, le seguenti condizioni di riferimento:

$$E_4 = \frac{V_{2n}}{\sqrt{3}}$$

$$I_4 = \frac{A_n}{3 \cdot E_4} = 524,864 A < I_{LT}$$

Dalla sezione 4, si determinano le grandezze delle sezioni a valle tramite i seguenti passaggi:

- sezione 4 (sezione di partenza)

$$P_4(I), Q_4(I), E_4, I$$

- sezione 3

$$P_3(I) := P_4(I) - \frac{G_L}{2} \cdot E_4^2$$

$$Q_3(I) := Q_4(I) + \frac{B_L}{2} \cdot E_4^2$$

$$A_3(I) := \sqrt{P_3(I)^2 + Q_3(I)^2}$$

$$E_3 := E_4$$

$$I_3(I) := \frac{A_3(I)}{E_3}$$

- sezione 2

$$P_2(I) := P_3(I) - R_L \cdot I_3(I)^2$$

$$Q_2(I) := Q_3(I) - X_L \cdot I_3(I)^2$$

$$A_2(I) := \sqrt{P_2(I)^2 + Q_2(I)^2}$$

$$I_2(I) := I_3(I)$$

$$E_2(I) := \frac{A_2(I)}{I_2(I)}$$

Le perdite possono essere espresse in funzione della corrente tramite le seguenti relazioni:

$$P_{com}(I) := 3 \cdot \left(\frac{G_L}{2} \right) \cdot E_2(I)^2 + 3 \cdot \left(\frac{G_L}{2} \right) \cdot E_4^2 + 3 \cdot R_L \cdot I_3(I)^2$$

$$Q_{com}(I) := -3 \cdot \left(\frac{B_L}{2} \right) \cdot E_2(I)^2 - 3 \cdot \left(\frac{B_L}{2} \right) \cdot E_4^2 + 3 \cdot X_L \cdot I_3(I)^2$$

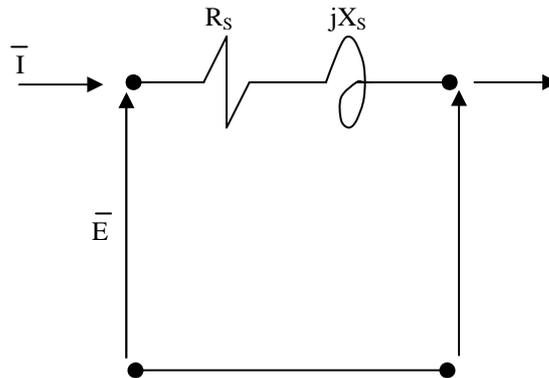
Sostituendo il valore della corrente di riferimento si ottiene:

$$P_L = P_{com}(I_4) \quad P_L = 2,766 \cdot 10^6 W$$

$$Q_L = Q_{com}(I_4) \quad Q_L = 7,089 \cdot 10^6 var$$

Perdite dei conduttori della stazione

I conduttori di stazione vengono schematizzati con un circuito equivalente monofase, riportato al primario del trasformatore, come di seguito riportato:



I parametri longitudinali dei conduttori di stazione valgono:

$$R_s = r_s \cdot l_s = 2,5 \cdot 10^{-4} \text{ ohm}$$

$$X_s = x_s \cdot l_s = 4,5 \cdot 10^{-3} \text{ ohm}$$

In accordo con quanto sopra riportato, si assume la corrente nominale primaria del trasformatore come valore della corrente in condizione di riferimento:

$$I_{n1} = \frac{A_n}{\sqrt{3} \cdot V_{1n}} = 314,918A$$

Le perdite dei conduttori di stazione valgono:

$$P_S = 3 \cdot R_s \cdot I_{n1}^2 \quad P_S = 74,38W$$

$$P_S = 3 \cdot X_s \cdot I_{n1}^2 \quad Q_S = 1,339 \cdot 10^3 W$$

4.4. Determinazione dei coefficienti di perdita

Coefficienti di perdita attivi

- perdite attive dipendenti dalla tensione di fase $P_{Erif} = P_o = 2,7 \cdot 10^4 W$
- perdite attive dipendenti dalla corrente di linea $P_{Irif} = P_{cc} + P_L + P_S = 2,982 \cdot 10^6 W$

Coefficienti di perdita reattivi

- perdite reattive dipendenti dalla tensione di fase $Q_{Erif} = Q_o = 1,39 \cdot 10^5 \text{ var}$
- perdite reattive dipendenti dalla corrente di linea $Q_{Irif} = Q_{cc} + Q_L + Q_S = 1,9 \cdot 10^7 \text{ var}$

Una volta determinati i coefficienti di perdita, possono essere scritte le equazioni di compensazione a valle, per il caso considerato:

$$P_T = P - \left(\frac{E^2}{E_{rif}^2} \cdot P_{Erif} + \frac{I^2}{I_{rif}^2} \cdot P_{Irif} \right)$$

$$Q_T = Q - \left(\frac{E^4}{E_{rif}^4} \cdot Q_{Erif} + \frac{I^2}{I_{rif}^2} \cdot Q_{Irif} \right)$$

Le precedenti equazioni possono essere applicate in qualsiasi condizione di funzionamento. Si consideri, ad esempio, la seguente condizione di funzionamento, a valle del trasformatore:

$E = 125,110 \text{ kV}$ corrispondente al 98,5% della tensione di fase primaria

$I = 157,459 \text{ A}$ corrispondente al 50 % della corrente nominale primaria

$\cos \varphi = 0,94$

$A = 3 \cdot E \cdot I = 59,1 \text{ MVA}$

$P = A \cdot \cos \varphi = 55,55 \text{ MW}$

$Q = \sqrt{A^2 - P^2} = 20,16 \text{ M var}$

Le perdite, in questa condizione di funzionamento sono date dalle seguenti relazioni:

$$P_p = \left(\frac{E^2}{E_{rif}^2} \cdot P_{Erif} + \frac{I^2}{I_{rif}^2} \cdot P_{Irif} \right) = 771,7 \text{ kW}$$

$$Q_p = \left(\frac{E^4}{E_{rif}^4} \cdot Q_{Erif} + \frac{I^2}{I_{rif}^2} \cdot Q_{Irif} \right) = 4,882 \text{ M var}$$

Quindi applicando le formule di compensazione si ottiene:

$$P_T = P - \left(\frac{E^2}{E_{rif}^2} \cdot P_{Erif} + \frac{I^2}{I_{rif}^2} \cdot P_{Irif} \right) = 54,78 \text{ MW}$$

$$Q_T = Q - \left(\frac{E^4}{E_{rif}^4} \cdot Q_{Erif} + \frac{I^2}{I_{rif}^2} \cdot Q_{Irif} \right) = 15,28 \text{ M var}$$

$P_T = 54,78 \text{ MW}$

$Q_T = 15,28 \text{ M var}$