

Verifica della tenuta al cortocircuito Parallelo di due cavi



La Norma CEI 64-8 si occuperà prossimamente più in dettaglio del collegamento in parallelo di cavi negli impianti elettrici di potenza. Questa pratica è usata in molte occasioni per più motivi, che abbiamo già richiamato nell'articolo apparso nel numero 780 di questa Rivista. La progettazione del parallelo di cavi richiede una certa cautela, anche perché essa risulta poco trattata nella stampa specializzata. Le difficoltà nello studio del parallelo dei cavi di potenza aumentano con il crescere del numero dei cavi, che si intende collegare tra loro, e con il crescere della loro sezione. Ciò per i motivi che in altri articoli in questa rivista sono stati o saranno descritti.

Giancarlo Tedeschi

Si tratterà in questa sede il caso più semplice e frequente costituito dal parallelo di due soli cavi ($n=2$, caso scuola), per affrontare prossimamente casi più complessi che prevedono un numero n di cavi in parallelo superiore. La norma tecnica proporrà, a nostro avviso anche inaspettatamente sotto alcuni aspetti, la possibilità di proteggere dalle sovracorrenti e dai cortocircuiti i singoli cavi costituenti il parallelo. Questo, riteniamo, nel caso si voglia, ad esempio, garantire una continuità, anche se non assoluta, nella alimentazione per tempi più o meno lunghi, secondo necessità, del carico elettrico totale o parziale delle sottese attività, dopo aver facilmente individuato il cavo sede del guasto. In proposito si proporrà, ad esempio, per ogni cavo costituente il parallelo l'adozione a monte e a valle dello stesso di due interruttori magnetotermici in grado di gestire la possibilità di segnalare e di isolare il cavo sede del guasto e di consentire in tempi brevi il riutilizzo dei rimanenti cavi sani per l'alimentazione del carico.

Per essere pratici consideriamo un trasformatore in olio MT/BT da 800 kVA, 24/04 kV, a perdite ridotte (5600 W, vcc 6%) e l'utilizzo per l'alimentazione del

quadro generale di bassa tensione posto a circa 11 m di distanza di due cavi in parallelo tra loro di sezione pari a 240 mm² per ogni fase (TNE, Cabine MT/BT). Lo schema elettrico di ogni fase è rappresentato in figura 1. Un caso interessante da approfondire vede l'utilizzo di quattro interruttori magnetotermici unipolari, due (I1 e I2) posti, come da figura, all'estremità (lato alimentazione dei cavi), e due (I3 e I4) posti all'altra estremità (lato carico).

Per quanto attiene la protezione dei due cavi da cortocircuito, sulla cui necessità certamente si potrebbe aprire un interessante approfondimento, risulta utile lo studio dei valori delle correnti di cortocircuito, che si manifestano per i guasti che possono avvenire in ogni punto lungo il loro percorso. Considerando il cavo 2 tali valori delle correnti di cortocircuito sono riportati nella figura 2. Il presunto cortocircuito, che avvenga, come detto, lungo il cavo 2, verrà alimentato da entrambi i cavi 1 e 2 e per isolare selettivamente il cavo sede del guasto devono intervenire e rimanere aperti entrambi gli interruttori posti a monte e a valle dello stesso cavo. I valori delle due correnti che interessano da un lato l'interruttore I2 e dall'altro gli interruttori I1, I3 e I4, chiamati inizialmente ad intervenire, sono rappresentati nella stessa figura 2. Lo studio del caso non cambia se il cortocircuito dovesse manifestarsi nel cavo 1. È evidente la simmetria della situazione.

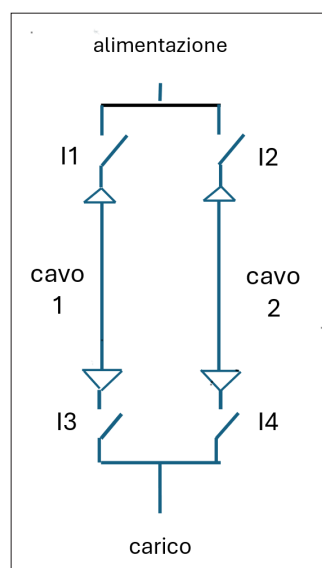


Figura 1 - Schema elettrico con protezioni di una fase (due cavi in parallelo), che alimenta dal trasformatore il quadro principale di BT.

Si osserva quanto di seguito si riporta.

1. Si ragiona a corrente impressa, nel senso che l'impedenza della sezione di impianto che collega il trasformatore al quadro principale, qualunque sia il punto in cui avviene il cortocircuito, non modifica significativamente il valore della corrente di cortocircuito da considerare. Se ci si dovesse riferire ad un caso simile a quello proposto nella Norma CEI 121-5, che prevede 100 m di conduttura a valle di un trasformatore da 1000 kVA formata con 5 x (1 x 240 mm²) conduttori per fase, i valori delle correnti di cortocircuito, su cui basare la taratura dei relè di protezione degli interruttori, risulterebbero meno facilmente determinabili;
2. più il punto di cortocircuito si sposta verso valle lungo il cavo, più le correnti di cortocircuito, che transitano nelle due vie che alimentano il punto di guasto, tendono ad uguagliarsi, per attestarsi alla fine sul valore di 7,2 kA, mentre al contrario i valori sono sempre più disuguali via via che il punto di cortocircuito si manifesta in prossimità del punto di alimentazione (14,4 kA per I2 e 0 kA per I4, I3 e I1);
3. si deve considerare che, nel caso la corrente di cortocircuito valga nel primo tratto del cavo 2, ad esempio 12,6 kA, se il punto di guasto si manifesta al primo quarto della sua lunghezza (caso a) e solo 1,8 kA negli interruttori I4, I3 e I1, aprirà per primo l'interruttore I2, mentre non apriranno contestualmente gli altri tre interruttori, in quanto interessati da una corrente molto più modesta. Una volta che I2 abbia aperto, tutta la corrente di guasto, cioè 14,4 kA interesserà i tre interruttori I1, I3 e I4 e solo I3 e I4 apriranno per quanto ipotizzato sui tempi di intervento al punto successivo;
4. sembra potersi affermare che assumendo e tarando opportunamente i tempi di intervento degli interruttori nel campo delle correnti di cortocircuito presunte/attese [ad es. tempi di ritardo per gli interruttori I1 ed I2 di un gradino superiore (ad es. 200 ms) al tempo di inter-

Corrente impressa di cortocircuito negli interruttori al variare del punto di cortocircuito lungo il cavo 2

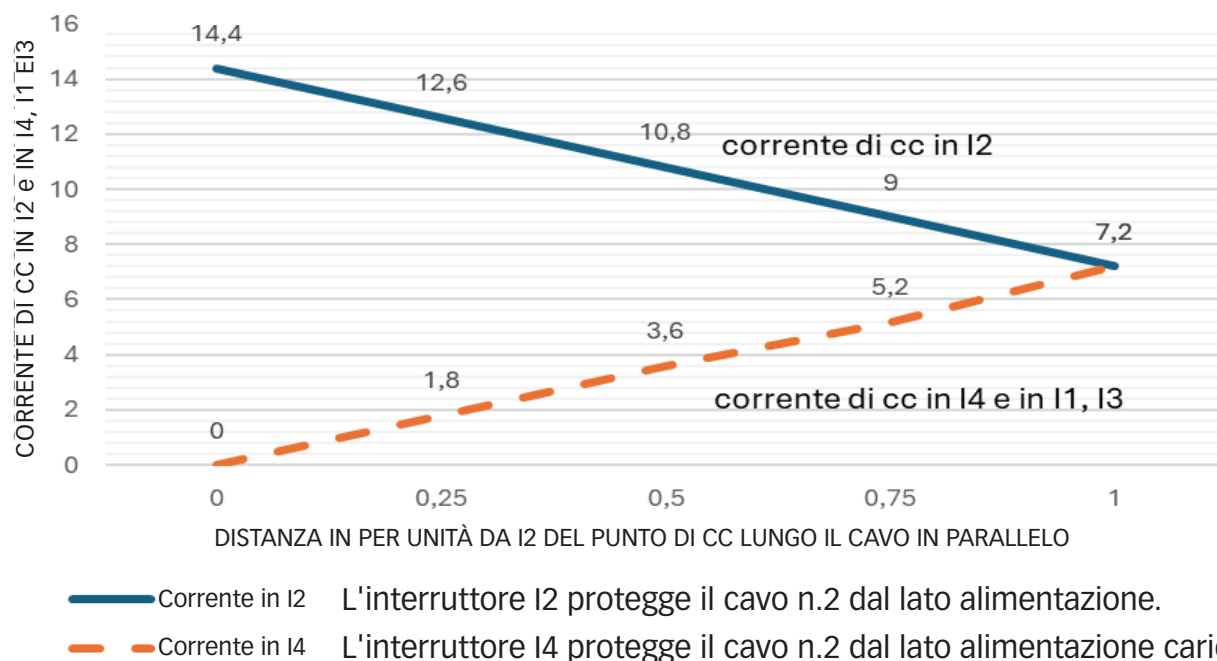


Figura 2 - Valore delle correnti di cortocircuito negli interruttori all'aumentare della distanza del punto di guasto dal trasformatore.

vento (ad es. 80 ms) di I3 e I4], è possibile dalla osservazione degli interruttori che rimangono aperti e chiusi, individuare se il punto di guasto appartiene alla sezione del parallelo dei cavi o se quello non sia a questa esterno, ad esempio sul quadro generale di BT. Si può inoltre contestualmente individuare anche se il cortocircuito riguarda il cavo 1 o il cavo 2;

5. la corrente di cortocircuito vale 7,2 kA, se il punto di guasto si manifesta alla fine del percorso del cavo 2, e vale ancora 7,2 kA la corrente che transita negli interruttori I4, I3 e I1. Secondo le tarature sopra indicate il sistema di protezione prevede che gli interruttori I3 e I4 intervengano per primi in circa 80 ms (7,2 kA maggiore di 5 kA, soglia di primo intervento prevista) e che l'interruttore a monte I2 intervenga con un leggero ritardo (200 ms). L'interruttore I1 rimane chiuso;
6. la tabella 1 descrive quanto accade e consente di individuare la sede del guasto in funzione degli interruttori che si aprono e che restano

chiusi in caso di cortocircuito alla fine del cavo 2 nelle diverse situazioni;

7. attenzione deve fare il progettista nella verifica della tenuta termica al cortocircuito dei cavi. Non tanto per il caso prospettato, che non pone particolari problemi, ma in altre situazioni, nelle quali le correnti di corto circuito sono ben maggiori a parità di sezioni dei cavi posti in parallelo. Ciò per il fatto, non proprio ordinario, per il quale uno stesso tratto di cavo può essere sottoposto a due sollecitazioni di corto circuito di durata diversa in tempi immediatamente successivi;
8. il calcolo dell'impulso termico (integrale di Joule) nel caso dei tempi ristretti a decine di millisecondi e a due centinaia di millisecondi non è di facile determinazione per i progettisti. Il supplemento di energia lasciato passare dagli interruttori a causa dei ripetuti iniziali picchi di corrente legati al transitorio di cortocircuito non può essere trascurato per due motivi. Ciò a causa del basso fattore di potenza,

INDIVIDUAZIONE DEL CAVO GUASTO				DUE CAVI COLLEGATI IN PARALLELO				
Legenda	x l'interruttore apre x l'interruttore apre -l'interruttore resta chiuso; l'interruttore chiuso quando gli altri sono aperti individua il cavo sano t ₁ circa 80 ms (tempo di intervento) e t ₂ circa 200 ms (tempo intervento) se l'interruttore a monte rimane chiuso significa che il cavo sotteso non è sede di guasto I ₁ e I ₂ intervengono in caso di cortocircuito in un tempo t ₂ I ₃ e I ₄ intervengono in caso di cortocircuito in un tempo t ₁							
				Icc (kA) in I ₁	Icc (kA) in I ₂	Icc (kA) in I ₃	Icc (kA) in I ₄	
	punto 1	inizio cc	Icc iniziale	0	14,4	0	0	
	cc in cavo 2 subito a valle di I ₂		Icc dopo prima apertura	14,4		14,4	14,4	
				I ₁ (t ₂)	I ₂ (t ₂)	I ₃ (t ₁)	I ₄ (t ₁)	
	prima	l'interruttore apre con intervento ritardato, t ₂	-	x	-	-	non aprono I ₁ , I ₃ e I ₄	
	dopo	subito dopo l'interruttore apre in t ₁	-	resta aperto	x	x	si può individuare il cavo guasto	
			Icc (kA) in I ₁	Icc (kA) in I ₂	Icc (kA) in I ₃	Icc (kA) in I ₄		
punto 2	inizio cc	Icc iniziale	1,8	12,6	1,8	1,8		
cc in cavo 2 a valle di I ₂		Icc dopo prima apertura	14,4		14,4	14,4	icc 1,8 kA non fa aprire I ₁ , I ₃ e I ₄	
			I ₁	I ₂	I ₃	I ₄		
a 1/4 della lunghezza del cavo a partire dal TR	prima	l'interruttore apre con l'intervento ritardato, t ₂	-	x	-	-		
	dopo	subito dopo l'interruttore apre in t ₁	-	resta aperto	x	x	si può individuare il cavo guasto	
			Icc (kA) in I ₁	Icc (kA) in I ₂	Icc (kA) in I ₃	Icc (kA) in I ₄		
punto 3	inizio cc	Icc iniziale	3,6	10,8	3,6	3,6		
cc in cavo 2 a valle di I ₂		Icc dopo prima apertura	0	14,4	0	0	icc 3,6 kA fa aprire I ₃ e I ₄	
			I ₁	I ₂	I ₃	I ₄		
a 1/2 della lunghezza del cavo a partire dal TR	prima	l'interruttore apre primo intervento, t ₁	-	-	x	x	si può individuare il cavo guasto	
	dopo	l'interruttore apre con l'intervento ritardato, t ₂	resta chiuso	x	resta aperto	resta aperto		
			Icc (kA) in I ₁	Icc (kA) in I ₂	Icc (kA) in I ₃	Icc (kA) in I ₄		

continua nella pagina seguente

INDIVIDUAZIONE DEL CAVO GUASTO				DUE CAVI COLLEGATI IN PARALLELO			
Legenda	x l'interruttore apre x l'interruttore apre -l'interruttore resta chiuso; l'interruttore chiuso quando gli altri sono aperti individua il cavo sano t ₁ circa 80 ms (tempo di intervento) e t ₂ circa 200 ms (tempo intervento) se l'interruttore a monte rimane chiuso significa che il cavo sotteso non è sede di guasto I ₁ e I ₂ intervengono in caso di cortocircuito in un tempo t ₂ I ₃ e I ₄ intervengono in caso di cortocircuito in un tempo t ₁						
punto 4	inizio cc	Icc iniziale	5,2	9	5,2	5,2	
		Icc dopo prima apertura	0	14,4	0	0	icc 5,2 kA fa aprire I ₃ e I ₄
cc in cavo 2 a valle di I ₂			I ₁	I ₂	I ₃	I ₄	
		l'interruttore apre primo intervento, t ₁	-	-	x	x	si può individuare il cavo guasto
a 3/4 della lunghezza del cavo a partire dal TR		l'interruttore apre con l'intervento ritardato, t ₂	-	x	resta aperto	resta aperto	
punto 5	inizio cc	Icc iniziale	7,2	7,2	7,2	7,2	
cc in cavo 2		Icc dopo prima apertura	0	14,4	0	0	icc 7,2 kA fa aprire I ₃ e I ₄
			I ₁	I ₂	I ₃	I ₄	
immediatamente a monte di I ₃		l'interruttore apre primo intervento, t ₁	-	-	x	x	si può individuare il cavo guasto
		l'interruttore apre con l'intervento ritardato, t ₂	-	x	resta aperto	resta aperto	
punto 6	inizio cc	Icc iniziale	7,2	7,2	7,2	7,2	
		Icc dopo prima apertura	0	0	0	0	
			I ₁	I ₂	I ₃	I ₄	
immediatamente a valle degli interruttori I ₃ e I ₄		l'interruttore apre primo intervento, t ₁	-	-	x	x	si può individuare che il guasto non riguarda i cavi
		l'interruttore apre con l'intervento ritardato, t ₂	-	-	resta aperto	resta aperto	

Tabella 1 - Descrizione intervento selettivo interruttori per guasti in punti diversi di due cavi di potenza in parallelo per ogni fase.

che esalta il supplemento di energia che sollecita i cavi e a causa del fatto che le brevissime durate dei cortocircuiti aumentano l'incidenza di tale contributo supplementare. Infatti le durate dei cortocircuiti nel caso considerato e in casi simili, sono confrontabili con la costante di tempo dei transitori di cortocircuito;

9. inoltre le curve messe a disposizione dai costruttori di interruttori per consentire la valutazione delle energie lasciate passare dagli interruttori non sono in ogni caso applicabili al caso in esame e ai casi simili, in quanto è consistente la differenza, in senso non cautelativo, del fattore di potenza delle correnti di cortocircuito da considerare con quello delle correnti di prova degli stessi interruttori utilizzati per giustificare le predette curve;
10. attenzione deve pure fare il progettista per un'altra circostanza. A nostro avviso il fattore di potenza della corrente di cortocircuito da contrastare presenta un valore incompatibile con la applicabilità delle prestazioni dichiarate dal costruttore¹. Dai nostri calcoli a valle dei cavi in parallelo il fattore di potenza della corrente di cortocircuito risulta pari a 0,167. Per interruttori con potere di interruzione fino a 20 kA il cos ϕ di prova vale 0,30 e per interruttori con potere di interruzione superiore fino a 50 kA vale 0,25. Il valore teorico calcolato risulta inferiore a quello di prova degli interruttori con PI fino a 20 kA del 33%. Questa criticità risulta accresciuta, se si valutano altre non trascurabili condizioni al contorno che in questa sede non abbiamo modo di considerare. Pertanto è bene che il progettista chieda al costruttore degli interruttori l'autorizzazione scritta all'utilizzo degli stessi in ogni specifica applicazione. Meglio sarebbe che i costruttori risolvessero questo problema una volta per sempre;
11. non è immediata la scelta e il reperimento nell'attuale mercato elettrico di economici

interruttori automatici idonei alle ipotizzate particolari applicazioni;

12. anche la gestione del neutro della sezione di impianto in esame non sembra semplice. Né nello stesso testo in esame della norma se ne trova traccia;
13. è chiaro che, a cavo guasto isolato, richiudendo gli interruttori a valle dello stesso cavo si può, con tutte le cautele del caso e tenendo conto dei dettagli di progettazione (sovradimensionamento della conduttura nei confronti del carico), ripristinare il servizio tutto o in parte per lunghi o brevi periodi;
14. è chiaro che nel caso esaminato non si risponde all'esigenza di una piena selettività con cortocircuiti che si presentino sul quadro a valle e sui circuiti ad esso sottesi. È sempre possibile comunque lavorare su più elevati valori di temporizzazione dei relè di protezione, affrontando sollecitazioni superiori per i cavi di parallelo;
15. altre strategie sono possibili per ottenere migliori risultati di selettività:
 - con gli interruttori posti sul quadro generale di BT alimentato (ad esempio se limitatori,
 - nella stessa sezione del parallelo di cavi esaminato utilizzando la selettività logica;
16. una importante criticità riguarda anche le tabelle di selettività proposte dai costruttori. Esse si riferiscono a condizioni standard definite dalla Norma. Queste risultano oggi obsolete, come abbiamo in passato e anche più sopra richiamato, e le tabelle non possono in molte situazioni essere applicate. Precisiamo in proposito che a valori inferiori del fattore di potenza della corrente di cortocircuito, i picchi dello spunto della corrente transitoria nei primi istanti aumentano. Il che non può che rendere la selettività più problematica;
17. si vedrà quanto nel caso di impianti più importanti (n maggiore di 2) la situazione si complich.

¹ Ciò almeno secondo le norme tecniche relative alla costruzione degli interruttori automatici.

CONCLUSIONI

Nella verifica della tenuta al cortocircuito dei cavi descritta, relativa al caso più semplice di parallelo, pur si sono evidenziate alcune non superate e non trascurabili criticità. Per affrontare senza danni tali criticità, che implicano una duplice diretta o indiretta responsabilità da parte di ogni attore della filiera, che realizza impianti elettrici importanti, è doveroso chiedere la collaborazione dei costruttori di interruttori automatici. Ciò per almeno condividere le connesse responsabilità.

La situazione descritta è emblematica di alcune criticità² ancora non risolte né presso i costruttori e né presso l'ambiente normativo tecnico. Al riguardo non sono state ancora fornite appropriate e compiute risposte. Né sorprendentemente esse sono affrontate oggi dalla maggioranza delle riviste che trattano dei problemi della progettazione degli impianti elettrici di potenza. Sembra che si sia posto e che si ponga ancora in essere inspiegabilmente nel mondo elettrotecnico, che conta, una specie di potente silenziatore, del tutto inaccettabile, trattando le criticità esposte non solo aspetti importanti di funzionalità, ma anche un aspetto prioritario, quale quello della sicurezza.

Molte altre utili considerazioni si possono proporre nello studio della verifica della tenuta termica dei cavi in condizioni di cortocircuito. In queste note abbiamo fatto osservare come sussistano nell'indifferenza generale di tutti i portatori di interesse coinvolti non poche criticità, come risulta alla lettura dei punti 7, 8, 9, 10 e 11.

Per affrontare al meglio tali criticità i progettisti sono obbligati a chiedere una più attiva collaborazione dei costruttori di interruttori automatici e dello stesso Comitato Elettrotecnico Italiano.

Osserviamo anche in queste note conclusive che sembra valga la pena di approfondire se alla norma tecnica spetti o sia conveniente per essa fornire indi-

cazioni progettuali di dettaglio sull'utilizzo dei cavi da collegare in parallelo, nonché se l'ambiente normativo sia veramente in grado di farlo compiutamente. Sugeriamo al comitato CEI competente di studiare in proposito la possibilità di fornire ai progettisti i coefficienti di sicurezza da adottare per il calcolo dell'integrale di Joule per tener conto dell'influenza sfavorevole del transitorio nella sua determinazione allo stabilirsi delle correnti di cortocircuito, naturalmente quando necessario. Stabilendo anche quando tale necessità ricorra.

² Dal 1996 il problema, di cui al punto 10, è stato posto e riscontrato ad alti livelli, inspiegabilmente (?) senza alcun seguito, con la lettera alla redazione pubblicato nella rivista AEIT apparsa nel n. 5/1996 di AEI insieme alla relativa risposta dell'allora Direttore Tecnico del CEI.