

CORRELAZIONE TRA FULMINAZIONI ED INTERVENTO DELLE PROTEZIONI NELLE RETI ELETTRICHE DI DISTRIBUZIONE

M. Bernardi ⁽¹⁾, A. Borghetti ⁽²⁾, R. Bortot ⁽³⁾, F. Napolitano ⁽²⁾, C.A. Nucci ⁽²⁾,
M. Paolone ⁽²⁾, L. Peretto ⁽²⁾, R. Tinarelli ⁽²⁾, R. Vitale ⁽³⁾

⁽¹⁾ CESI, ⁽²⁾ Università di Bologna, ⁽³⁾ ENEL Distribuzione
carloalberto.nucci@unibo.it

Introduzione

Come noto i buchi di tensione costituiscono uno dei maggiori elementi di disturbo nelle reti di distribuzione caratterizzate da una sempre maggiore presenza di apparati sensibili [1]. Studi recenti, rivolti all'identificazione delle sorgenti di tale tipologia di disturbi [2-5], evidenziano che, nelle reti elettriche localizzate in regioni con elevato livello ceraunico, i buchi di tensione, ed i guasti, sono più frequenti durante i periodi con maggiore attività temporalesca. In caso di fulminazioni dirette ed indirette i buchi di tensione sono associati all'intervento dei dispositivi di protezione in seguito a scariche fase-terra o fase-fase provocate dalle sovratensioni.

La memoria illustra una procedura per determinare la correlazione fra fulminazioni e manovre dei dispositivi di protezione presenti nelle reti di distribuzione. La procedura è basata sull'utilizzo coordinato delle informazioni fornite: (i) da sistemi di rilevamento fulmini (in Inglese 'Lightning Location Systems', LLS) che forniscono una stima del punto di impatto del fulmine, della corrente al suolo ed altre caratteristiche delle fulminazioni nube-terra; (ii) da sistemi di monitoraggio dei dispositivi di protezione e (iii) da un apposito codice di calcolo (LIOV-EMTP) in grado di riprodurre la risposta a fulminazioni dirette ed indirette della rete elettrica di interesse.

La procedura tiene conto delle incertezze nella stima della posizione del punto d'impatto e della intensità della corrente di fulmine mediante il metodo di Monte Carlo, e fornisce la probabilità di scarica associata a ciascuna fulminazione.

1. Utilizzo coordinato di sistemi di monitoraggio e simulazioni numeriche

La procedura di correlazione fra fulminazioni nube-terra e guasti o buchi di tensione nei sistemi elettrici di distribuzione si basa sulla disponibilità congiunta di dati sperimentali forniti da sistemi di monitoraggio distribuiti e di un opportuno codice di calcolo in grado di simulare il comportamento della rete elettrica soggetta a fulminazioni dirette ed indirette. In particolare, per il presente studio sono utilizzati i dati forniti dal Sistema Italiano di Rilevamento Fulmini, CESI-SIRF [6,7] e dal Sistema Acquisizione Manovre CESI-SAM [8] congiuntamente a simulazioni eseguite mediante il codice di calcolo LIOV-EMTP¹ [9-11].

Come descritto in [5,12,13], i tre criteri utilizzati per la correlazione sono: (i) l'evento atmosferico e l'intervento della protezione sono registrati all'interno di una finestra temporale di 1 s, (ii) il punto di impatto è a distanza non maggiore di 2 km dalla linea più vicina e (iii) la massima sovratensione indotta, stimata attraverso la corrente massima degli "stroke" che compongono la fulminazione registrata dal LLS, sommata alla tensione stazionaria di rete risulta eccedere il Critical Flashover Voltage (CFO) con una probabilità dell'80%.

1.1 Sistema Italiano di Rilevamento Fulmini – CESI-SIRF

Il Sistema Italiano di Rilevamento Fulmini CESI-SIRF è composto da 16 sensori installati all'interno del territorio Italiano. In aggiunta ai dati forniti da tali sensori sono utilizzati anche i dati forniti dai sistemi Austriaco, Francese e Svizzero.

¹ Il codice di calcolo LIOV-EMTP è stato sviluppato all'interno di una collaborazione internazionale tra l'Università di Bologna lo Swiss Federal Institute of Technology, l'Università di Roma 'La Sapienza' ed il CESI.

I sensori del CESI-SIRF sono in grado di rilevare eventi con correnti minime dell'ordine dei 2 kA [6,7] entro un raggio di 370 km. Tale dato, assieme alla dislocazione dei sensori, garantisce una cosiddetta "detection efficiency" globale di circa il 90% sull'intero territorio nazionale.

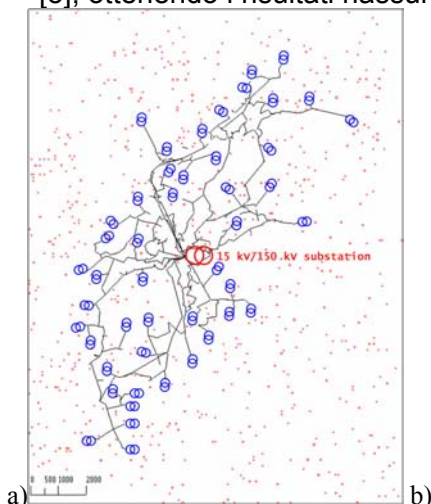
Il sistema CESI-SIRF fornisce informazioni spaziali e temporali relativamente alle fulminazioni nube-terra tramite la stima del punto di impatto (nel sistema di coordinate WGS84) e del tempo assoluto (UTC-GPS) di ogni singolo "stroke" di una fulminazione. L'accuratezza spaziale e temporale di tali stime risulta essere nell'ordine di circa 500 m per la localizzazione e di 120 ns per il tempo assoluto [12]. In particolare per ciascun evento il sistema fornisce una stima dell'incertezza della posizione del punto d'impatto mediante i parametri che definiscono un'ellisse corrispondente al 50% di probabilità di includere l'effettivo punto d'impatto ed il centro dell'ellisse è il punto con probabilità maggiore.

1.2 Sistema Acquisizione Manovre – CESI-SAM

Il sistema di monitoraggio delle manovre delle protezioni, CESI-SAM, è costituito da un sistema di acquisizione dati installato in alcune cabine di trasformazione primarie della rete elettrica di distribuzione. Tale sistema effettua un monitoraggio delle manovre dei relé di protezione (sovracorrenti, guasti omopolari ed intervento degli interruttori) installati sui diversi "feeder" che originano dalla cabina primaria. Il sistema CESI-SAM fornisce, per ciascuna manovra, il tempo UTC-GPS con campionamento ogni 10 ms [8].

1.3 Il codice di calcolo LIOV-EMTP

Il codice di calcolo LIOV-EMTP, consente di simulare la risposta alle fulminazioni della rete di distribuzione, è costituito dall'interfacciamento fra il codice di calcolo LIOV (Lightning induced Overvoltages code) e l'EMTP (Electromagnetic transient program). Il codice LIOV consente di riprodurre la distribuzione spazio-temporale della corrente di fulmine lungo il canale di scarica, di calcolare il campo elettromagnetico da essa prodotto e di simularne l'accoppiamento con la linea aerea di distribuzione multiconduttore, tenendo conto degli effetti della conducibilità finita del suolo. L'interfacciamento con l'EMTP consente di rappresentare la complessa configurazione delle tipiche reti di distribuzione, come quella mostrata in figura 1. La figura 1° mostra anche i punti di impatto delle fulminazioni localizzati dal SIRF durante l'anno 1999, per i quali si è applicata la procedura di correlazione descritta [5], ottenendo i risultati riassunti nella figura 1b.



	Eventi correlati utilizzando il solo criterio temporale	Eventi con elevata probabilità di scarica valutati utilizzando il codice LIOV-EMTP (*)	Eventi correlati utilizzando sia il criterio temporale sia i risultati delle simulazioni con il codice LIOV-EMTP
Numero di scariche monofase	14	11 (6)	4
Numero di scariche fra più fasi	16	21 (13)	4

(*) in parentesi il numero di eventi individuati, considerando i valori massimi delle sovratensioni indotte solo alle terminazioni delle linee.

Fig 1. a) Configurazione della rete di distribuzione considerata e punti di impatto delle fulminazioni rilevate dal SIRF durante l'anno 1999. b) Tabella riassuntiva dei risultati della procedura di correlazione. Adattato da [5].

2. Valutazione degli effetti delle incertezze dei LLS sulla correlazione

La procedura proposta per la correlazione consente di valutare gli effetti delle incertezze

relative alla stima del punto di impatto e della corrente di fulmine sul calcolo delle sovratensioni indotte [14]. La procedura si basa sull'applicazione del metodo Monte Carlo:

1. per ciascun evento rilevato dal LLS, è generato un insieme di punti d'impatto le cui coordinate spaziali sono ottenute utilizzando una distribuzione normale bi-variata, centrata sul punto d'impatto stimato ed avente una probabilità cumulata del 50% in corrispondenza dell'ellisse d'incertezza fornita dal LLS;
2. è generato un insieme di correnti di fulmine, utilizzando la distribuzione dell'incertezza sulla corrente stimata da parte del LLS;
3. per ciascun evento generato, è calcolata la sovratensione indotta nel sistema elettrico di distribuzione;

4. dall'insieme di sovratensioni indotte calcolate, si determina la distribuzione di probabilità cumulata che viene confrontata con le caratteristiche di tenuta dell'isolamento delle linee che compongono il sistema elettrico al fine di stabilire la probabilità di guasto dell'evento stesso.

Un esempio dei risultati ottenuti è mostrato il Fig. 2. Il sistema considerato è composto da un "feeder" di 2 km e da due linee laterali di 0.5 km. Le linee che compongono il sistema sono tipiche linee aeree trifasi di media tensione, con altezza media dal suolo di uno dei conduttori (conduttore c2) pari a 10,8 m e quella degli altri due conduttori (c1 e c3) pari a 10 m. Alle terminazioni sono connessi tipici trasformatori di distribuzione rappresentati nel modello con capacità pari a 250 pF. La figura 2a mostra anche il punto d'impatto stimato assieme ai punti di impatto generati tramite il metodo Monte Carlo. A scopo illustrativo, si considera un valore stimato della corrente di fulmine pari a 100 kA, un'inclinazione dell'ellisse di incertezza pari a 45°, un rapporto tra gli assi principali dell'ellisse $m/M=0.5$ ed una dimensione del semiasse maggiore dell'ellisse di 300 m. La figura 2b mostra la probabilità di scarica per ciascuno dei conduttori delle linee che compongono il sistema relativamente al caso di terreno perfettamente e non perfettamente conduttore (con conducibilità pari a 0.001 S/m).

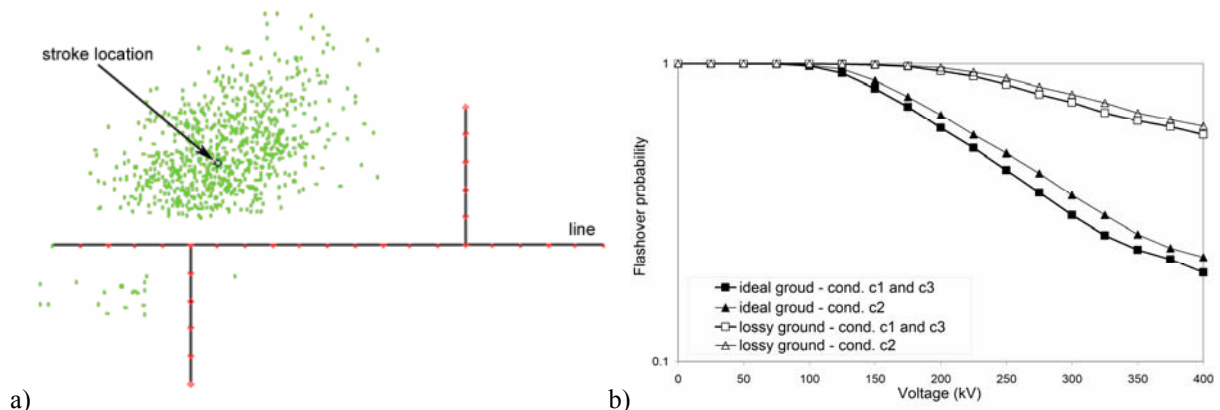
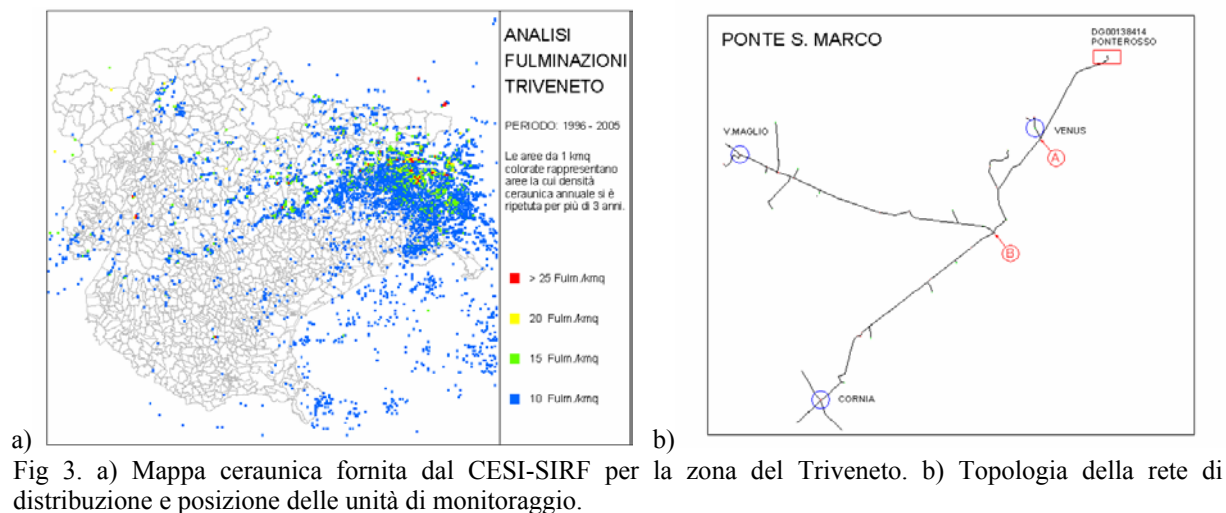


Fig 2. a) Struttura del sistema di distribuzione e punti di impatto generati tramite il metodo di Monte Carlo. b) Probabilità di scarica per ciascuno dei conduttori delle linee che compongono il sistema di distribuzione sia per terreno ideale sia per terreno non perfettamente conduttore (conducibilità=0.001 S/m). Adattato da [14].

3. Monitoraggio dei disturbi aperiodici in una rete di distribuzione

Per l'approfondimento dell'analisi dei disturbi aperiodici nelle reti di distribuzione e della loro correlazione con le fulminazioni, si è programmata un'attività di monitoraggio dei transitori elettromagnetici in una rete del Friuli-Venezia Giulia, scelta per l'elevata esposizione a tali eventi, come mostrato dalla mappa SIRF di figura 3a. La figura 3b mostra la topologia della rete di distribuzione considerata. La figura mostra anche le tre cabine secondarie in cui saranno collocati i sistemi di monitoraggio e di registrazione dei transitori.



Il sistema di monitoraggio è del tipo ad architettura distribuita ed è composto da varie unità remote la cui struttura è mostrata in figura 4 [15].

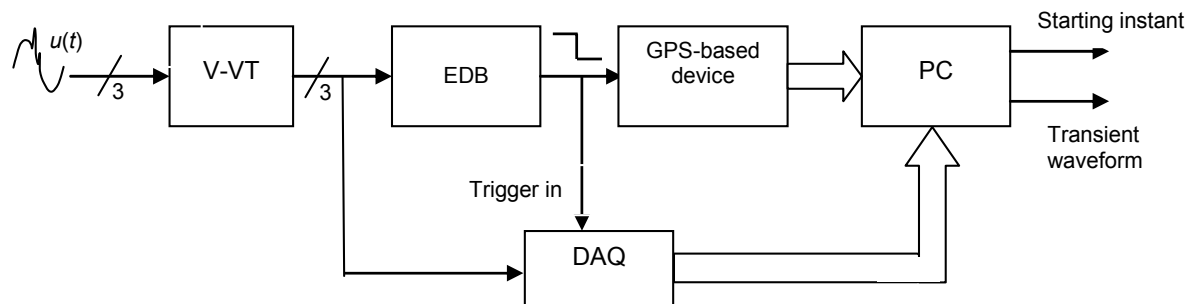


Fig 4. Schema a blocchi di una unità del sistema distribuito di monitoraggio. Adattato da [15].

La misura della tensione di ciascuna fase è effettuata tramite un trasduttore capacitivo (V-VT) la cui uscita è inviata sia al blocco di rilevazione di transitori (EDB) che al blocco di acquisizione e conversione A/D (DAQ) che acquisisce il segnale di tensione nell'intervallo di tempo in cui si è verificato l'evento transitorio. L'EDB è un dispositivo appositamente progettato presso l'Università di Bologna per rilevare la presenza di transitori sovrapposti alla normale tensione di rete e fornire un segnale logico negato di tipo TTL che, al verificarsi di un evento transitorio, agisce come pre-trigger per la DAQ e come trigger per un dispositivo GPS che opera la registrazione dell'istante d'inizio del transitorio medesimo.

Le tre unità che saranno installate presentano le seguenti specifiche. Il partitore capacitivo è un Pearson VD-305A ed è caratterizzato da un rapporto nominale 10000V/1V, da una tensione di isolamento di 300 kV di picco, da una banda 30Hz ÷ 4MHz (-3dB), da un tempo di salita di 100 ns e, infine, da una accuratezza nominale pari a ±1%. La sua uscita, come detto, costituisce l'ingresso dell'EDB, realizzato con un circuito analogico il cui principio di funzionamento è descritto in [15]. La sua uscita è di tipo TTL negato allo scopo di poter interfacciarsi con il dispositivo GPS. Quest'ultimo dispositivo registra, con incertezza nominale di ±250 ns, l'istante corrispondente al fronte di discesa del segnale al suo ingresso. Inoltre esso fornisce un impulso logico (sempre di tipo TTL) di periodo 1 s (incertezza nominale ±250ns) che è utilizzato per sincronizzare tutte le funzioni svolte dal sistema di misura. Per quel che riguarda il dispositivo d'acquisizione e conversione A/D, esso è costituito da un sistema a 14 bit, avente una frequenza di campionamento massima di 100 MSa/s per canale (campionamento simultaneo), una incertezza nominale pari allo 0.65% del valore del campione più 8 mV di offset e una memoria interna di 64 Mb per canale. La

memoria è gestita in modo segmentato, permettendo così la registrazione di più eventi. Infine, ciascuna unità di misura è equipaggiata di modem GSM/GPRS per connettersi all'unità di controllo e trasmettere le informazioni di misura.

4. Conclusioni

L'attività di ricerca descritta in questa memoria ha consentito di sviluppare una procedura per la correlazione, fra guasti o problemi di "power quality" nelle reti di distribuzione e fulminazioni. La correlazione è effettuata sulla base (a) dei dati registrati da un sistema rilevamento fulmini, in Italia il CESI-SIRF, (b) delle informazioni disponibili dal sistema monitoraggio delle protezioni della rete e (c) sull'utilizzo di un codice di simulazione della risposta della rete alle fulminazioni, sia dirette sia indirette. Per tener conto delle diverse cause d'incertezza dei dati, con particolare riferimento alle stime del punto d'impatto e dell'intensità della corrente di fulmine, la procedura fornisce, per ogni specifico evento, la probabilità di correlazione. La stima è ottenuta mediante l'implementazione del Metodo Monte Carlo, e rappresenta il dato utile per individuare se i fulmini sono la causa di problemi di "power quality" nella rete d'interesse.

Inoltre, con la medesima procedura è possibile simulare l'impatto delle fulminazioni sulla rete, ipotizzando variazioni della sua configurazione e delle caratteristiche delle linee (per esempio con l'inserimento di nuovi tratti di linea o la modifica di tratti di linea aerea in linea in cavo) o l'inserimento di protezioni (scaricatori, funi di guardia, ecc.). La procedura consente quindi di valutare anche l'efficacia dei suddetti provvedimenti mediante la stima della variazione della correlazione prevista fra eventi di "power quality" e fulminazioni.

Si ritiene che la procedura proposta possa essere efficacemente verificata e ulteriormente migliorata sia sulla base dei risultati sperimentali che saranno raccolti con la prevista installazione di unità di monitoraggio, appositamente sviluppate, in grado di registrare i transitori di tensione in rete causati dalle fulminazioni e il tempo di inizio della perturbazione, sia grazie alla messa a punto di modelli di porzioni di rete di distribuzione e della loro simulazione mediante i sofisticati strumenti di calcolo sviluppati.

Bibliografia

- [1] R.B. Anderson, "Lightning performance criteria for electric power systems", Proc. IEE-C, vol. 132, no. 6, pp. 298-306, 1985.
- [2] E.W. Gunther and H. Mehta, "A survey of distribution system power quality-preliminary results", IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 10-1, January 1995, pp. 322-329.
- [3] C. Boonseng, V. Kinnares, "Analysis of harmonic for 12-pulse converter under unbalanced voltage operation due to lightning related voltage sags and short interruption", IEEE PES Winter Meeting, 2001, vol. 3, pp.1009-1014.
- [4] N. Balijepalli, S.S. Venkata, C.W. Richter, R.D. Christie, V.J. Longo, "Distribution system reliability assessment due to lightning storms", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 20, No. 3, pp. 2153-2159, July 2005.
- [5] C.A. Nucci, A. Borghetti, M. Paolone, P. Borselli, M. Bernardi, S. Malgarotti, I. Mastandrea, F. Rachidi, "Lightning-Induced Voltages on Overhead Distribution Lines: Theoretical and Experimental Investigation of related Problems and their Impact on Power Quality", Cigré 2004 Session, Parigi Francia, 29 Agosto - 3 Settembre 2004.
- [6] R. Iorio, D. Ferrari, "1995 descriptive statistics on lightning activity over Italy, obtained by means of the Italian lightning detection system 'CESI-SIRF' ", Proc. 23rd International Conference on Lightning Protection, Florence (Italy), September 1996, , vol.1, pp. 191-196.
- [7] M. Bernardi, D. Ferrari, "The Italian lightning detection system (CESI-SIRF): main statistical results on the first five years of collected data and a first evaluation of the improved system behaviour due to a major network upgrade", Proc. 25th International Conference on Lightning Protection, Rhodos (Grece), September 2000, addendum in section 2.
- [8] M. Bernardi, C. Giorgi, V. Biscaglia, "Medium voltage line faults correlation with lightning events recorded with the Italian LLP system CESI-SIRF", Proc. 24th International Conference on Lightning Protection, Birmingham-UK, 1998, vol.1, pp. 187-192.
- [9] C.A. Nucci, F. Rachidi, M. Ianoz, C. Mazzetti, "Lightning-induced overvoltages on overhead lines", IEEE Trans. on EMC, 1993, vol. 35,-1, pp. 75-86.
- [10] F. Rachidi, C.A. Nucci, M. Ianoz, C. Mazzetti, "Influence of a lossy ground on lightning-induced voltages on overhead lines", IEEE Trans. on EMC, 1996, vol. 38-3, pp. 250-264.

- [11] A. Borghetti, J.A. Gutierrez, C.A. Nucci, M. Paolone, E. Petrache, F. Rachidi, "Lightning-induced voltages on complex distribution systems: models, advanced software tools and experimental validation", *Journal of Electrostatics*, Vol. 60/2-4, pp. 163-174, Elsevier, 2004.
- [12] M. Paolone, L. Peretto, R. Sasdelli, R. Tinarelli, M. Bernardi, C.A. Nucci, "On the Use of Data from Distributed Measurement Systems for Correlating Voltage Transients to Lightning", *IEEE Trans. on Instrumentation & Measurement* Vol. 53, Issue 4, Agosto 2004, pp. 1202-1208.
- [13] C.A. Nucci, M. Paolone, M. Bernardi, "Use of Lightning Location Systems Data in Integrated Systems for Power Quality Monitoring", *Proc. IEEE T&D Conference, Yokohama (Japan), October 2002*, vol.1, pp. 552-556.
- [14] A. Borghetti, C.A. Nucci, M. Paolone and M. Bernardi, "A Statistical Approach for Estimating the Correlation between Lightning and Faults in Power Distribution Systems", *Proc. of the 9th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems, KTH, Stockholm, Sweden – June 11-15, 2006*.
- [15] L. Peretto, P. Rinaldi, R. Sasdelli, R. Tinarelli, "A System for the Measurement of the Starting Instant of Impulsive Transients", *Proc. of the 21st IEEE IMTC/04, Como (Italy), 18-20 May 2004*, vol 2, pp. 1394-1398.