

Controllo predittivo dei sovraccarichi termici nelle linee ad alta tensione

Juliano S.A. Carneiro, Luca Ferrarini

Nel presente articolo viene illustrata una strategia di controllo innovativa relativa al problema dei sovraccarichi termici in linee elettriche di trasmissione. L'approccio è basato su tecniche predittive. Risultati di simulazione mostrano che le prestazioni dello schema di controllo proposto sono superiori a quelle dei sistemi attualmente impiegati per arginare le congestioni di rete, lasciando dunque ben sperare che ci siano margini di miglioramento.

L'introduzione del mercato elettrico, sia in Italia sia nel resto del mondo, ha spinto il sistema elettrico verso il massimo sfruttamento delle risorse di rete e la riduzione dei margini di sicurezza in fase di esercizio del sistema elettrico. Di conseguenza, la probabilità di accadimento di sovraccarichi termici delle linee non è trascurabile, specialmente in condizioni di funzionamento a pieno carico caratterizzate da reti di trasmissione vulnerabili con elevati flussi di potenza.

Sovraccarichi termici, transitori o permanenti, risultano da transiti elevati di corrente sui circuiti di trasmissione. Le sovracorrenti causano una perdita resistiva, che si tramuta in un aumento di energia termica e dunque in un aumento della temperatura del conduttore. Il surriscaldamento del conduttore può provocare diversi fenomeni dannosi [1], come la perdita di forza del cavo causata dal suo invecchiamento precoce o cortocircuiti verso terra dovuti all'espansione del metallo e alla conseguente riduzione del franco della linea. Cortocircuiti verso terra sono particolarmente critici e, in casi estremi, possono innescare l'apertura di linee in cascata con la separazione incontrollata di rete. Infatti, alcuni dei recenti disservizi sono stati causati oppure aggravati dalla perdita di sezioni critiche dovuta ai sovraccarichi termici, incluso il blackout nel sistema WSCC del 2 Luglio 1996 [2], il disservizio del 14 Agosto 2003 in Nord America [3] e il blackout Italiano del 28 Settembre 2003 [4].

Nonostante la gravità dei sovraccarichi termici, attualmente esistono pochi sistemi di protezione contro tali disturbi. Generalmente, gli operatori del sistema elettrico si basano sugli algoritmi di *Optimal Power Flow* (OPF) [5] per valutare, in modo manuale, le azioni di controllo atte ad arginare i sovraccarichi termici. Tuttavia, in caso di flussi di potenza troppo elevati, è necessario dotare le sezioni critiche di sistemi di protezione automatici detti Special Protection Schemes (SPS) [6]. Gli SPS sono progettati per identificare situazioni che possono creare sollecitazioni eccessive al sistema elettrico e attuare predeterminate azioni correttive in modo da contenere

il disturbo iniziale. Uno dei pochi SPS dedicati al controllo di sovraccarichi termici è il sistema Italiano noto come Elaboratori Distacchi Automatici (EDA) [7], il cui principio di funzionamento si basa sull'alleggerimento automatico del carico per evitare la perdita in cascata delle linee di una sezione critica.

Come precedentemente indicato, l'analisi e il progetto della logica di intervento viene fatta offline tramite studi di transitori e di regime con alcune tipologie di rete, contingenze e condizioni di carico. Tali studi portano ovviamente ad una soluzione non generalizzata e basata, molto frequentemente, sui casi più estremi (pessimi). Il risultato è un sistema di protezione conservativo nonché specifico del sistema elettrico sotto controllo. Perciò è necessario sviluppare uno schema di controllo generale in grado di coordinare in maniera ottimale diverse azioni correttive disponibili in un sistema elettrico.

Una nuova strategia di protezione contro i sovraccarichi termici delle linee di trasmissione è stata proposta nel presente articolo. La logica di intervento prende spunto dalla teoria del controllo predittivo [9] e dal lavoro descritto in [10], nel quale i sovraccarichi termici sono mitigati introducendo vincoli espliciti sui flussi di potenza nel problema di ottimizzazione. Al contrario, lo schema di controllo proposto include il modello termico dei conduttori e le misure ambientali nella formulazione del problema di ottimizzazione, in modo che i vincoli possano essere impostati direttamente sulle temperature dei cavi anziché sulle correnti. Risultati preliminari [10] mostrano i possibili benefici ottenibili rispetto agli schemi di protezioni esistenti in letteratura.

L'articolo è strutturato nella seguente maniera: inizialmente si descrive lo schema di controllo proposto, dopodiché vengono illustrati alcuni risultati di simulazione e analizzate le prestazioni degli SPS. Infine, si presentano le principali conclusioni ed i possibili sviluppi futuri.

L'obiettivo di controllo

Il sovraccarico termico di uno o più collegamenti, se non prontamente controllato, può portare all'intervento delle pro-

J. S.A. Carneiro, ERSE, Milano; L. Ferrarini, Politecnico di Milano, Milano

tezioni locali di linea e all'apertura dei circuiti sovraccaricati. La perdita di un collegamento, in assenza di uno SPS dedicato al monitoraggio e al controllo dei flussi di potenza, potrebbe provocare il sovraccarico degli altri collegamenti sani ed instaurare un fenomeno di apertura di linee a cascata nel sistema elettrico. L'obiettivo del controllore proposto consiste nel mantenere la temperatura dei conduttori al di sotto dei loro limiti termici e, di conseguenza, nell'evitare l'intervento delle protezioni locali e l'apertura dei collegamenti. La differenza tra lo schema idealizzato in [9] e l'approccio proposto riguarda, appunto, la variabile controllata: mentre il primo impone vincoli sui transiti di corrente, il secondo limita le temperature dei conduttori. Infatti, gli effetti dannosi (riduzione del franco e ricottura) sono causati da una temperatura elevata piuttosto che da una corrente eccessiva. Tale distinzione richiede che il controllore sia in grado di stimare online la temperatura delle linee.

Lo schema di controllo proposto è illustrato nella figura 1. Tramite il modello termico dei conduttori, nonché le misure in campo delle correnti sulle linee e delle variabili ambientali, si ricava una stima della temperatura dei cavi. Successivamente le temperature dei conduttori vengono utilizzate per chiudere l'anello di controllo del sistema al posto dei transiti di corrente. Ad ogni multiplo intero k del periodo di campionamento T_{sc} , il controllore predittivo risolve un problema di ottimizzazione vincolato ed applica la prima azione di controllo della sequenza valutata, $u(k)$, al sistema elettrico secondo il principio del *Receding Horizon* [8]. Al passo di campionamento successivo, la procedura viene ripetuta con l'orizzonte di predizione spostato in avanti nel tempo di T_{sc} . Questo procedimento di ottimizzazione online introduce un'importante retroazione al sistema di controllo che attenua gli eventuali disturbi.

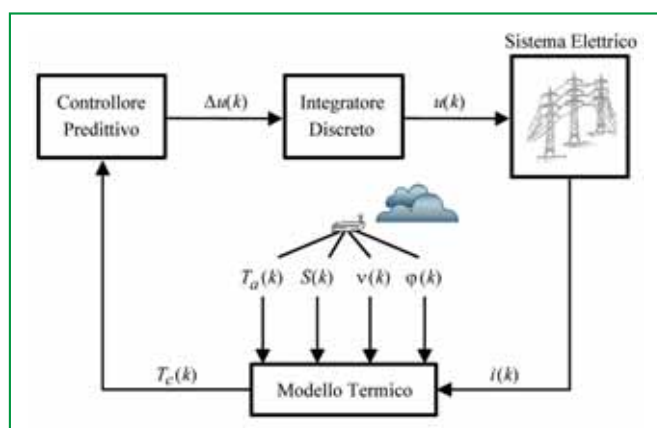


Figura 1 - Schema di controllo dei sovraccarichi termici delle linee di trasmissione

Modelli di predizione

Gli algoritmi predittivi utilizzano un modello del sistema sotto controllo, la misura dello stato corrente e una sequenza di azioni di controllo per stimare la traiettoria futura delle variabili controllate. Data la complessità ed il costo computazionale della procedura di ottimizzazione online, è fonamen-

tale trovare un compromesso tra l'accuratezza del modello di predizione e il tempo di calcolo. Nei seguenti paragrafi vengono proposti modelli semplificati che rappresentano i principali fenomeni di interesse: la dinamica termica dei conduttori, la dinamica elettrica delle reti di trasmissione e la dinamica delle variabili ambientali.

Modello termico

Il modello termico delle linee aeree usato nel presente lavoro è il risultato di uno studio Cigre (Committee 22, Work Group 12). Il comportamento termico è rappresentato tramite un'equazione non lineare del prim'ordine che descrive il bilancio istantaneo tra potenze entranti ed uscenti nel conduttore:

$$\begin{aligned} \frac{dT_c}{dt} &= f(T_c, i, d_w) \\ &= \frac{1}{mC_p} [q_j(i, T_c) + q_s(S) - q_c(T_c, T_a, v, \varphi) - q_r(T_c, T_a)] \end{aligned} \quad (1)$$

dove T_c è la temperatura del conduttore, i è la corrente elettrica, mC_p è la capacità termica del conduttore, q_j e q_s sono rispettivamente le potenze Joule e solare, q_c e q_r sono rispettivamente le perdite per convezione e radiazione, $d_w = [T_a, S, v, \varphi]^T$ è il vettore delle variabili ambientali composto da temperatura ambiente T_a , irraggiamento solare S , velocità del vento v e direzione del vento φ .

La formulazione tradizionale del controllo predittivo si applica ad un modello lineare a tempo discreto [8]. Derivando analiticamente (1) nell'intorno del punto $(\bar{T}_c, \bar{i}, \bar{d}_w)$ e tenendo presente che il conduttore è raramente in condizione di equilibrio, si ricava il modello richiesto:

$$\begin{aligned} \delta \dot{T}_c &= f(\bar{T}_c, \bar{i}, \bar{d}_w) + A_c \delta T_c + B_{ci} \delta i + B_{cw} \delta d_w \\ T_c &= \bar{T}_c + \delta T_c \end{aligned} \quad (2)$$

dove

$$A_c = \left[\frac{\partial f}{\partial T_c} \right], \quad B_{ci} = \left[\frac{\partial f}{\partial i} \right], \quad \text{e} \quad B_{cw} = \left[\frac{\partial f}{\partial d_w} \right].$$

Una volta ottenuto il sistema linearizzato a tempo continuo sopra descritto, si valuta il modello a tempo discreto applicando il metodo *Zero-Order Hold*, in cui gli ingressi sono supposti costanti all'interno del periodo di discretizzazione T_{sd} :

$$\begin{aligned} T_c(k+1) &= \bar{T}_c + f_0 + A \delta T_c(k) + B_i \delta i(k) + \\ &+ B_w \delta d_w(k) \end{aligned} \quad (3)$$

Modello elettrico

Le dinamiche elettriche delle reti di trasmissione hanno costanti di tempo molto inferiori ai fenomeni termici delle linee aeree. Tenendo conto anche del requisito legato al tempo di computazione, si è deciso di rappresentare le variabili elettriche tramite un modello algebrico lineare ottenuto dal DC Power Flow. Tale scelta modellistica si appoggia sulla forte dipendenza della temperatura del conduttore dalla corrente elettrica. Inoltre, il principio di Receding Horizon tende a compensare gli errori di predizione tramite la retroazione dello stato.

L'algoritmo di DC Power Flow consente di trovare i flussi di potenza attiva nei rami della rete elettrica tramite la soluzione di un sistema di equazioni lineari dato da: $\mathbf{P}=\mathbf{B}\boldsymbol{\theta}$, dove \mathbf{P} è il vettore colonna composto da $N-1$ iniezioni di potenza attiva nei nodi, \mathbf{B} è la matrice $(N-1)\times(N-1)$ delle ammettenze nodali ridotta, $\boldsymbol{\theta}$ è il vettore colonna formato da $N-1$ angoli delle tensioni nodali, N è il numero di nodi della rete. Ottenuti gli angoli delle tensioni nodali, si possono ricavare i transiti di potenza sulle linee come:

$$P_{rs} = \frac{1}{x_{rs}} \sum_{t=1}^{N-1} (C_{rt} - C_{st}) P_t \tag{4}$$

dove r, s, t sono nodi generici della rete, C_{rt} e C_{st} sono gli elementi della matrice definita come $\mathbf{C}=\mathbf{B}^{-1}$, x_{rs} è la reattanza serie tra i nodi r e s . In altri termini, l'equazione (4) esprime il flusso di potenza attiva sul ramo P_{rs} in funzione della potenza attiva iniettata al nodo P_t . Dato che il DC Power Flow si basa sull'assunzione di un profilo piatto di tensione, i flussi di potenza attiva sono le correnti nelle linee, mentre le potenze attive iniettate nei nodi possono essere viste come azioni di controllo (dispacciamento dei generatori e alleggerimento dei carichi). Perciò, la relazione tra le correnti delle linee e le azioni di controllo può essere riscritta come:

$$i(k+1) = i(k) + S_p \Delta u(k) \tag{5}$$

dove $i(k+1)$ e $i(k)$ sono i vettori con le correnti nei rami in due istanti di campionamento successivi, $\Delta u(k)$ è il vettore composto dalle variazioni delle variabili di controllo, S_p la matrice di sensitività i cui coefficienti valgono:

$$(S_p)_{rs,t} = \frac{C_{rt} - C_{st}}{x_{rs}} = \frac{\Delta P_{rs}}{\Delta P_t} \tag{6}$$

Modello ambientale

Le variabili climatiche giocano un ruolo fondamentale nell'equazione di bilancio termico dei conduttori. Tradizionalmente, le utility adottano conservativamente il criterio deterministico riportato nella tabella 1. In sostanza, vengono prese

le condizioni ambientali pessime (temperatura ambiente massima, velocità del vento minima) per compensare le variazioni temporali (giornaliere e stagionali) e spaziali delle variabili climatiche.

Variabile	Valore
Temperatura ambiente (T_a)	40 °C
Irraggiamento solare (S)	1000 W/m ²
Velocità del vento (v)	0.61 m/s
Direzione del vento (φ)	90 °

Tabella 1 - Condizioni ambientali deterministiche

La capacità di stimare con precisione le condizioni meteorologiche si traduce in guadagni significativi in termini di prestazioni del sistema di controllo. In questo studio si assume che sistemi di monitoraggio delle condizioni ambientali, localizzati nei franchi critici delle linee di trasmissione, forniscano le medie orarie delle misure della temperatura ambiente, dell'irraggiamento solare, della velocità e della direzione del vento. Successivamente è possibile introdurre un'ulteriore ipotesi semplificativa, usuale nell'ambito degli algoritmi di controllo predittivo, nella quale il disturbo è tenuto costante lungo l'orizzonte di predizione:

$$d_w(k+1) = d_w(k) \tag{7}$$

Si noti che le variabili climatiche sono da intendersi proprio come disturbi, visto che non possono essere controllate. Anche se modelli ambientali più accurati sono desiderabili, l'incostanza della velocità e direzione del vento rende difficile la previsione accurata di tali grandezze. In questi casi, semplici modelli come quelli descritti nella (7) forniscono delle indicazioni assai soddisfacenti.

Il problema di ottimizzazione vincolato

Normalmente, in un problema di controllo tradizionale, l'obiettivo del progettista è garantire l'inseguimento di un segnale di riferimento con requisiti sulla velocità di risposta e sull'errore a regime. Tuttavia, nel problema di controllo dei sovraccarichi termici delle linee, non esiste un segnale di riferimento da inseguire. Infatti, le temperature dei conduttori possono assumere qualsiasi valore finché esse siano inferiori ai limiti termici dei cavi. La soluzione usuale per gestire tali problematiche consiste nell'impostare vincoli espliciti sulle variabili controllate (cioè le temperature dei conduttori) invece di penalizzarle nel funzionale di costo.

Come visto in precedenza, l'obiettivo di controllo è assicurare che le temperature dei conduttori rimangano al di sotto dei loro limiti termici lungo l'intero orizzonte di predizione H_p :

$$T_c(k+j+1) \leq T_c^{\max}, \quad j = 0, \dots, H_p - 1 \tag{8}$$



dove T_c^{max} è il vettore che contiene le massime temperature ammissibili dei cavi.

Si definisca:

$$\Delta u(k+j+1|k)$$

come il vettore delle variazioni di controllo, riferito all'istante di tempo $k+j+1$ ($j=0, \dots, H_p-1$), ma valutato al tempo k . Il problema di ottimizzazione vincolato consiste nel trovare la sequenza ottimale composta da H_p future variazioni di controllo

$$\Delta \mathbf{u}(k) = [\Delta u(k|k), \dots, \Delta u(k+H_p-1|k)]^T$$

che minimizza il funzionale di costo quadratico:

$$\min_{\Delta \mathbf{u}(k)} J(k) = \sum_{j=0}^{H_p-1} \|\Delta u(k+j|k)\|_R^2 \quad (9)$$

soggetto a:

$$\begin{aligned} T_c(k+j+1|k) &= \bar{T}_c(k) + f_0(k) + A(k)\delta T_c(k+j|k) + \\ &\quad + B_i(k)\delta i(k+j|k) + B_w(k)\delta d_w(k+j|k) \\ d_w(k+j+1|k) &= d_w(k) \\ i(k+j+1|k) &= i(k+j|k) + S_p(k)\Delta u(k+j|k) \\ u(k+j+1|k) &= u(k+j|k) + \Delta u(k+j|k) \\ \Delta u^{\min} &\leq \Delta u(k+j|k) \leq \Delta u^{\max} \\ u^{\min} &\leq u(k+j+1|k) \leq u^{\max} \\ T_c(k+j+1|k) &\leq T_c^{\max} \end{aligned}$$

dove R è la matrice dei costi associati alle variazioni di controllo, Δu^{\min} , Δu^{\max} , u^{\min} , u^{\max} sono vettori che rappresentano i limiti inferiori e superiori delle variazioni di controllo e dei valori assoluti degli ingressi.

Risultati di simulazione

Le prestazioni del sistema di protezione proposto contro i sovraccarichi termici vengono analizzate e confrontate con la soluzione esistente in letteratura [9] tramite simulazioni numeriche effettuate sulla rete elettrica di prova descritta in seguito.

La rete di prova

La rete di prova, illustrata nella figura 2, ha una struttura simile al sistema usato in [9], ma contiene più flessibilità di controllo rispetto alla rete originale. In particolare, il sistema è

composto da: un trasformatore sfasatore (PST); cinque gruppi di generazione; sette linee di trasmissione; cinque carichi; cinque sbarre. Dove i carichi ed i generatori sono rappresentati come fonti di potenza attiva, le linee sono descritte tramite le loro reattanze serie, e il trasformatore PST è espresso mediante una fonte di potenza attiva in parallelo alla sua reattanza serie.

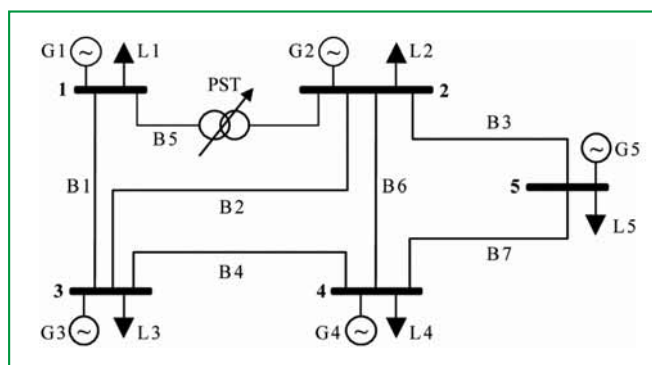


Figura 2 - Sistema elettrico sotto controllo

Controllo	R	Δu^{\min}	Δu^{\max}	u^{\min}	u^{\max}
PST	1	-1 °	1 °	-25 °	25 °
Generatore	10	-2 pu	2 pu	0 pu	30 pu
Carico	100	-5 pu	0 pu	0 pu	20 pu

Tabella 2 - Azioni di controllo

Le azioni di controllo disponibili nella rete di prova riguardano il cambiamento dell'angolo interno del trasformatore PST, la variazione della potenza erogata dai generatori controllabili G1 e G2, infine la modifica della potenza richiesta dai carichi alleggeribili L3 e L4. La priorità delle diverse azioni di controllo viene gestita assegnando opportunamente i costi (pesi) della matrice R . L'alleggerimento del carico è indubbiamente l'azione di controllo più "costosa", seguito dal ridispacciamento dei gruppi di generazione e finalmente dalla variazione del setpoint del trasformatore PST. La tabella 2 riporta i costi relativi alle diverse azioni di controllo, nonché i vincoli sulle variazioni ammissibili degli ingressi all'interno del periodo di campionamento T_{sc} e sui massimi valori assoluti.

Definiti i vincoli ed i costi delle azioni di controllo, resta ancora da assegnare il periodo di discretizzazione del modello termico T_{sd} , il periodo di campionamento del controllore predittivo T_{sc} e l'orizzonte di predizione H_p . Normalmente, le costanti di tempo termiche dei conduttori sono all'incirca 15 minuti, mentre i trasformatori sfasatori ed i generatori hanno dinamiche dell'ordine di qualche decina di secondi. Di conseguenza, l'orizzonte di predizione è stato scelto uguale a 1 ora in modo tale da coprire il tempo di assestamento della dinamica più lenta del sistema controllato. Inoltre, visto che il controllore predittivo deve valutare i riferimenti ottimali per gli anelli di regolazione interni (generatori e trasformatore PST), il suo periodo di campionamento deve essere più lento rispetto ai regolatori veloci e viene impostato pari a 5 minuti,

in modo tale da garantire il disaccoppiamento tra i diversi livelli di regolazione. Infine, il periodo di discretizzazione viene messo pari a 1 minuto per rappresentare correttamente la dinamica termica delle linee di trasmissione.

Con lo scopo di paragonare i due controllori predittivi, si è deciso di applicare all'approccio proposto in [10] gli stessi vincoli e costi descritti nella tabella 2, così come le tempistiche sopra riportate. Si assume che tutti i collegamenti siano costituiti dal conduttore unificato ACSR \varnothing 31,5 mm con reattanze serie identiche. In più, il profilo di carico giornaliero italiano è stato usato per rappresentare le variazioni tipiche di domanda del sistema di trasmissione elettrico nazionale. Nelle sezioni successive vengono riportati i risultati di simulazione dei due controllori predittivi suddivisi secondo la stagione di interesse: fredda o calda.

Stagioni fredde

Per illustrare il funzionamento degli schemi di controllo dei sovraccarichi termici durante le stagioni fredde, si fa riferimento alla perdita di un generatore. Più nello specifico, il disturbo consiste nella riduzione del 50% della potenza erogata dal gruppo G4, e tale contingenza accade nel 3 gennaio 2005 dalle 6:40 alle 16:10. La figura 3 riporta le temperature delle quattro linee più calde durante l'intera giornata nel caso in cui non siano presenti schemi di protezioni contro i sovraccarichi termici. A causa della riduzione dell'energia fornita dal gruppo G4, si verifica l'aumento del flusso di potenza sulla linea B6 e il superamento della temperatura ammissibile del cavo, fissata a 100 °C. Si nota che la temperatura del conduttore durante il disservizio raggiunge 128 °C e porta ad un rischio significativo di cortocircuito verso terra ed invecchiamento precoce del cavo.

La figura 4 illustra l'operazione del controllore basato sulla regolazione della corrente dei conduttori [9]. Si vede chiaramente che le temperature dei quattro cavi più caldi sono molto inferiori ai loro limiti termici. Anche se l'obiettivo primario del controllo è stato raggiunto, cioè le temperature di tutte le linee restano al di sotto dei 100 °C, si verifica che il controllore agisce molto "energicamente". Infatti, la temperatura massima della linea B6 è di circa 80 °C a causa degli alleggerimenti di carico e dei ridispacciamenti eccessivi. La bassa moderazione del controllore è una conseguenza diretta del criterio ambientale deterministico nella tabella 1, che risulta essere molto conservativo durante le stagioni fredde. Nel caso peggiore, il controllore basato sulla regolazione della corrente potrebbe intervenire sul sistema anche se non richiesto, causando lo stacco indesiderato degli utenti.

Il controllore basato sulla regolazione della temperatura dei conduttori fornisce una soluzione al problema sopra assegnato. L'introduzione del modello termico dei cavi e delle misure ambientali consente non solo di stimare precisamente le temperature dei collegamenti, ma anche di valutare accuratamente le azioni di controllo per evitare il surriscaldamento delle linee. La figura 5, conferma quanto appena detto: la temperatura del ramo più caldo (B6) è leggermente inferiore al suo limite termico. Le azioni di controllo sono decisamente più moderate rispetto al caso proposto in [9], sia in termine di intensità che di durata.

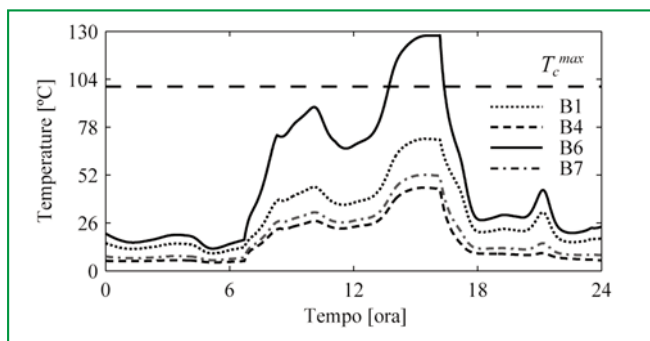


Figura 3 - Temperature dei conduttori nel 3 gennaio 2005 dopo la perdita di 50% del parco di generazione G4

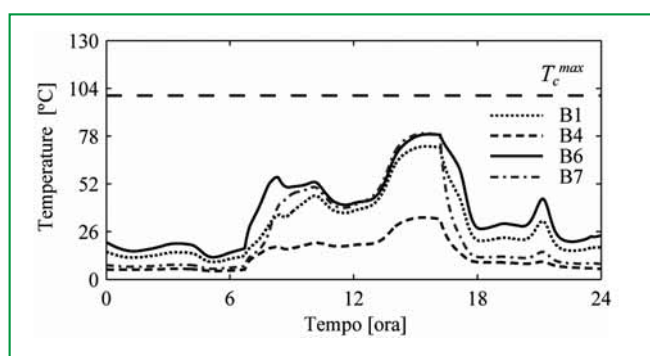


Figura 4 - Operazione del controllore esistente in letteratura [9]. Temperature dei conduttori nel 3 gennaio 2005

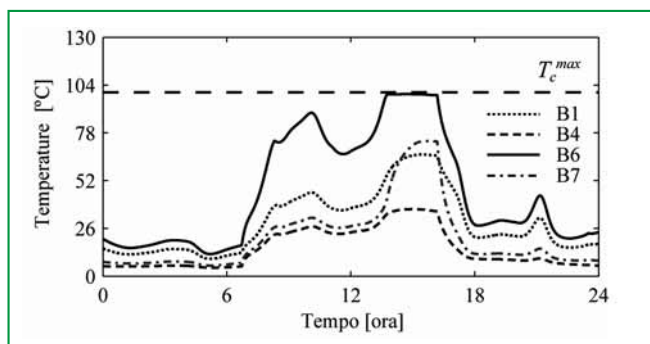


Figura 5 - Operazione del controllore proposto. Temperature dei conduttori nel 3 gennaio 2005

Stagioni calde

Per quanto riguarda l'operazione dei differenti schemi di controllo durante le stagioni calde, si considera come contingenza l'apertura di un collegamento del sistema. In questo esempio, il guasto interessa la linea B7 nel 27 maggio 2005 dalle 2:20 alle 13:30. La figura 6 mostra le temperature dei rami più caldi nell'arco della giornata qualora non siano disponibili sistemi adatti a controllare i sovraccarichi termici. Dalla figura si nota l'evidente surriscaldamento della linea B6, che raggiunge una temperatura di picco pari a 123 °C.

Al contrario della situazione invernale, il controllore basato solamente sulla corrente tende a sottostimare le temperature effettive dei conduttori. La figura 7, mostra appunto che il controllore proposto in [9] non è in grado di mantenere la temperatura della linea B6 entro il limite ammissibile, nonostante

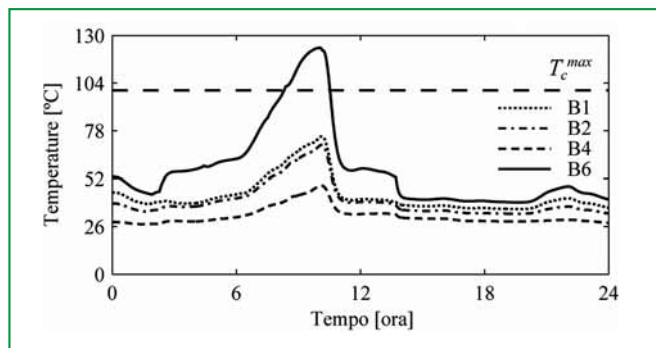


Figura 6 - Temperature dei conduttori nel 27 maggio 2005 dopo la perdita del collegamento B7

il criterio ambientale deterministico sia stato impiegato per valutare la portata di corrente massima dei cavi. Le azioni di controllo applicate al sistema elettrico sono così moderate da non evitare il sovraccarico. Questo indica che le classiche condizioni climatiche riportate nella tabella 1, largamente conservative nel periodo invernale, portano invece ad un rischio reale di surriscaldamento delle linee di trasmissione durante il periodo estivo.

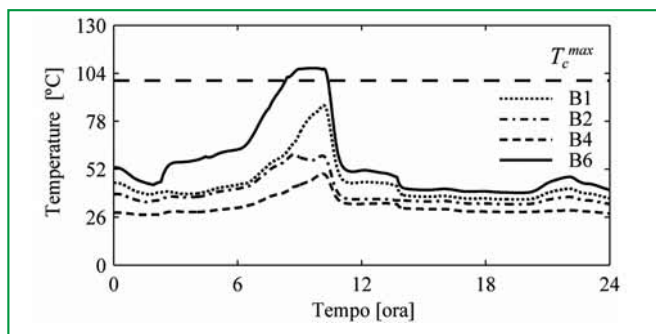


Figura 7 - Operazione del controllore esistente in letteratura [9]. Temperature dei conduttori nel 27 maggio 2005

Ancora una volta, lo schema di protezione basato sulla regolazione della temperatura soddisfa gli obiettivi di controllo prefissati. La figura 8 dimostra che le temperature di tutti i collegamenti rientrano nei limiti termici ammissibili. Similmente al periodo invernale, la misura online delle variabili ambientali permette di calcolare le azioni di controllo giuste per mitigare il sovraccarico della linea B6.

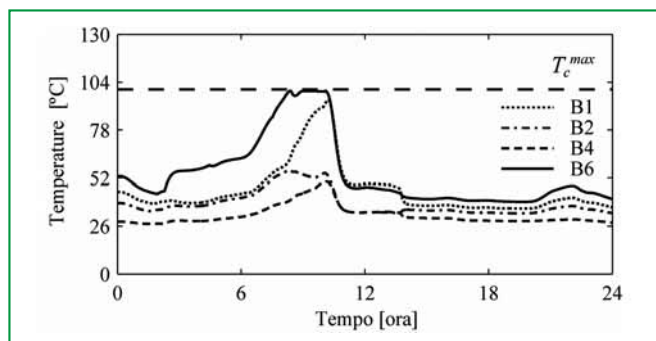


Figura 8 - Operazione del controllore proposto. Temperature dei conduttori nel 27 maggio 2005

Conclusioni e sviluppi futuri

In questo lavoro viene affrontato il problema di controllo dei sovraccarichi termici delle linee di trasmissione. La soluzione proposta si basa sulla teoria del controllo predittivo per coordinare le diverse azioni di controllo e, contemporaneamente, minimizzare un opportuno funzionale di costo nel rispetto di vincoli espliciti sulla temperatura dei conduttori. Le temperature future delle linee di trasmissione sono previste utilizzando il modello termico linearizzato dei conduttori. Le correnti elettriche sono ottenute tramite il DC Power Flow, mentre le variabili ambientali sono tenute costanti e uguali all'ultimo campione misurato da un sistema di monitoraggio ambientale.

Simulazioni numeriche su un semplice sistema di prova sono state svolte per confrontare la soluzione proposta con un sistema di protezione esistente in letteratura contro i sovraccarichi termici. I risultati hanno dimostrato che lo schema proposto potrebbe migliorare la prestazione degli SPS dedicati ad arginare il riscaldamento eccessivo dei conduttori. Inoltre, il nuovo schema consentirebbe anche di ridurre le azioni complessivamente richieste per soddisfare gli obiettivi di controllo, il che è assai importante in un sistema complesso come quello elettrico. Come sviluppi futuri, si potrebbero provare modelli di rete basati su AC Power Flow, in modo da tener conto della gestione della potenza reattiva e dunque delle ulteriori azioni di controllo così disponibili, ad esempio con i trasformatori a rapporto variabile (OLTC), con il dispacciamento del reattivo dei generatori e con banchi di condensatori. Inoltre, si intende investigare le problematiche legate all'implementazione di uno SPS reale, con requisiti di comunicazione, affidabilità e tempistica.

Bibliografia

- [1] H. Wan, J. D. McCalley, V. Vittal, "Increasing thermal rating by risk analysis", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 14, n. 3, pp. 815-821, August 1999.
- [2] C. Q. Liu, "A discussion of the WSCC 2 July 1996 outages," *IEEE Power Engineering Review*, vol. 18, n. 10, pp. 60-61, 1998.
- [3] *Final report on the August 14, 2003 blackout in the United States and Canada: causes and recommendations*, North American Electric Reliability Council (NERC), 2004.
- [4] *Final report on the 28 September 2003 blackout in Italy*, Union for the Coordination of Transmission of Electricity (UCTE), April 2004.
- [5] J. Carpentier, "Optimal power flow," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 1, n. 1, pp. 3-15, April 1979.
- [6] D. Karlsson (convener), *System protection schemes in power networks*, Cigre Task Force 38-02-19, June 2001.
- [7] R. Salvati, "Piano di difesa del sistema elettrico," *Rapporto Tecnico DR-RPX04052 Rev.01*, GRTN, 2000.
- [8] J. M. Maciejowski, *Predictive Control with Constraints*, Harlow (U.K.), Prentice Hall, 2002.
- [9] B. Otomega, A. Marinakis, M. Glavic, T. Van Cutsem, "Model predictive control to alleviate thermal overloads," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 22, n. 3, pp. 1384-1385, August 2007.
- [10] J. S. A. Carneiro, L. Ferrarini, "A Special Protection Scheme Against Thermal Overloads in Transmission Lines," in *Proceedings of IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing*, Moscow, Russia, June 3-5, 2009.