s22_27_isr6_04 30.09.2004 11:46 Uhr Seite 2

Sovrappassi di linee elettriche aeree su impianti funiviari: effetti di corto circuito dovuto a caduta o abbassamento di un conduttore elettrico

Roberto Benato, Luigi Cicolini**, Agostino Dallago**, Fabio Degasperi**, Antonio Paolucci*,*
**Universit di Padova — Dipartimento di Ingegneria Elettrica, **Servizi Impianti a Fune della Provincia Autonoma di Trento*

Introduzione

La grande estensione sul territorio della rete elettrica di trasmissione nazionale (RTN) costituita principalmente da linee aeree, comporta un gran numero d'intersezioni dei tracciati delle linee stesse con quelli di altre opere ad es. strade, linee ferroviarie, impianti funiviari, canali e corsi d'acqua.

Per il territorio italiano, le prescrizioni di legge concernenti tali casi (definiti "attraversamenti") rientrano nell'ambito del Regolamento di esecuzione per le linee aeree esterne e impongono (a seconda della tensione nominale d'esercizio) un insieme di criteri costruttivi, distanze da rispettare, calcoli di verifica meccanica (per i conduttori, gli isolatori e i sostegni) ai fini di conseguire una adeguata affidabilità in corrispondenza di circostanziate situazioni ambientali particolarmente cautelative.

In questa memoria, considerati i "sovrappassi" di alcune linee elettriche aeree su impianti a fune, si riferisce brevemente sui calcoli effettuati per valutare le ampiezze delle correnti di un possibile corto circuito provocato dalla caduta o dall'abbassamento accidentale di un conduttore elettrico su una fune funiviaria e sulle procedure sperimentali eseguite sia per riprodurre alcuni eventi di corto circuito sia per rilevare i conseguenti danni sulla fune stessa.

Tale studio è stato promosso e finanziato dalla Provincia Autonoma di Trento e dalla Regione Autonoma Valle d'Aosta, e affidato all'Università di Padova (Dipartimento di Ingegneria Elettrica) che ne ha curato lo sviluppo nelle seguenti fasi:

1. ipotesi di eventi possibili;
2. calcolo delle entità e durate di possibili correnti di corto circuito;
3. valutazione dei parametri fondamentali e significativi da adottare nelle indagini sperimentali;
4. coordinamento delle indagini sperimentali (prove, con elevate correnti su funi per funivie di diversi tipi, eseguite dal Laboratorio SVEPPI) e delle verifiche di danno per mezzo di controlli a vista e prove di strappo sulle funi stesse (eseguite dal Laboratorio Tecnologico LA.T.I.F).

Anche se gli eventi ipotizzati rientrano in una fascia di probabilità estremamente ridotta (considerate le cautelative prescrizioni di legge previste dal citato regolamento per l'esecuzione delle linee aeree), i risultati dello studio assumono un ruolo significativo perché portano alla luce insospettati fenomeni poco appariscenti ma di decisiva importanza per la sicurezza degli impianti a fune.

1. Ipotesi di eventi possibili

L'art. 2.3.06 del Regolamento citato prescrive, per gli attraversamenti, l'impiego di "attacchi rinforzati" (v. art. 1.2.11) in modo da evitare la caduta del conduttore elettrico nel caso di rottura di un isolatore.

La foto di fig. 1 mostra una configurazione tipica che una linea elettrica (in doppia terna) può assumere alle estremità di una campata di attraversamento: si noti l'utilizzo di attacco rinforzato tramite amarraggio dei conduttori elettrici con doppia catena di isolatori, in modo da accrescere in loco il grado di affidabilità. Ciononostante, il principio di precauzione induce a considerare e studiare l'evenienza, per quanto poco probabile, di un cedimento del dispositivo di fissaggio del conduttore stesso alla doppia catena (ad esempio perno o anello).

Fig. 1 Attacchi rinforzati (amarraggi con doppia catena di isolatori — Linea 220 kV a due terne nel sovrappasso sulla funivia Malcesine — Monte Baldo)

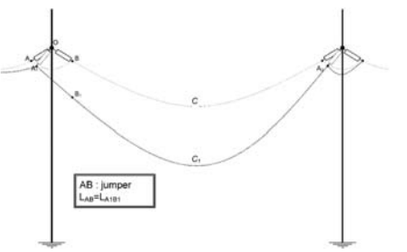


Fig. 2 Abbassamento di un conduttore dovuto al cedimento in B dell amarro OB

Tensione Nominale U_N [kV]	Distanza di rispetto D [m]
20	1.80
60	2.40
132	3.48
220	4.80
380	7.20

Tab. 1 Distanze di rispetto minime previste dall'art. 2.1.06 del Regolamento

La fig. 2 mostra solo il più basso dei conduttori di fase, disposto secondo la catenaria C e tesato in modo da garantire in ogni circostanza le debite distanze di rispetto (tab. 1) dalla fune F dell'impianto funiviario.

La stessa figura mostra anche come il cedimento ipotizzato del perno in B possa consentire al conduttore (integri restando tutti gli altri componenti ed esaurita la fase dinamica) di configurarsi definitivamente secondo una nuova catenaria C1 (punteggiata) che si

s22_27_isr6_04 30.09.2004 11:46 Uhr Seite 3

estenderebbe da A1 a A2 sfruttando la lunghezza LA1B1=LAB del tratto "a festone" usualmente chiamato "collo morto": ad esempio, un semplice calcolo mostra che l'incidente suddetto in un amarro dell'attraversamento # 2 (Malcesine-Monte Baldo) comporterebbe, nella mezzeria di campata, un abbassamento del conduttore pari a circa 10 m notevolmente superiore alla distanza di rispetto e tale quindi da causare un sicuro contatto con F, collocata a circa metà campata.

Quando nel suo moto di avvicinamento alla fune F il conduttore di fase raggiunge la distanza di scarica dalla fune stessa (messa a terra tramite i piloni) si ha l'innesco di un arco elettrico in cui si instaura la corrente di corto circuito subtransitoria fase-terra (v. § 2).

Con riferimento all'attraversamento #2 (UN=230 kV) la distanza di scarica sarebbe pari a circa 38 cm: data l'elevata velocità di caduta, il conduttore copre tale distanza d'arco in breve tempo (che può essere stimato in 40 ms), e prosegue il suo moto fino ad urtare più o meno violentemente la fune F così che alla conduzione d'arco segue una conduzione per contatto metallico più o meno efficiente. È da notare che in genere il contatto non resta localizzato sulla fune ma tende a migrare su di essa sotto l'azione delle notevoli forze elettrodinamiche e delle forze d'impatto sui conduttori così che il danno causato dalla corrente non resta concentrato ma tende a distribuirsi lungo la fune stessa.

Le usuali protezioni distanziomentriche, di cui gli estremi di una linea di trasmissione ad alta o altissima tensione sono sempre dotati, provocano l'interruzione del guasto in circa 500 ms .

Un'altra ipotesi da considerare potrebbe essere lo rottura del conduttore di fase, che può cadere liberamente fino ad "appoggiarsi" sulla fune F: tale evento peraltro, anche se grave dal punto di vista meccanico, comporta un'iniezione di corrente nella fune sensibilmente più ridotta perché il corto circuito viene alimentato da una sola estremità della linea.

È importante notare che le complesse vicende dinamiche che si possono verificare, oltre gli esempi ipotizzati, con casistica estremamente varia (velocità di caduta, urto, eventuali rimbalzi e sfregamento di un conduttore elettrico sulla fune della funivia) comportano generalmente effetti assai evidenti e direttamente constatabili o quantomeno ben valutabili a posteriori; per contro diventa assai difficile sia desumere a vista sia valutare teoricamente i danni dovuti a corto circuito. Per questo motivo, si è focalizzato lo studio sui soli effetti elettrici.

Nella tab. 2 vengono riportati i parametri fondamentali degli attraversamenti (sovrappassi) presi in esame e, fra i risultati di calcolo, la corrente subtransitoria (kA eff.) di corto circuito più elevata prevedibile.

2. Calcolo delle entità e durate di possibili correnti di corto circuito

Lo studio e il calcolo delle correnti di corto circuito è un argomento ben codificato nell'ambito dei sistemi elettrici per l'energia. Esso peraltro richiede una modellizzazione adeguata del sistema elettrico [1, 2] unita a una profonda conoscenza dei fenomeni provocati dal corto circuito in tutti gli elementi della rete (dalle linee, alle stazioni fino ai gruppi di generazione) e inoltre l'utilizzo di metodologie teoriche (reti alle sequenze, sistemi multiconduttore, algoritmi matriciali avanzati) che non possono esser esposte nei limiti di questa memoria. In tale ambito, il Gruppo di Ricerca Sistemi Elettrici per l'Energia del Dipartimento Ingegneria Elettrica dell'Università di Padova ha messo a punto un algoritmo automatico fondato sull'analisi matriciale dei sistemi multiconduttore in cui sono anche considerati i mutui accoppiamenti induttivi e capacitivi sia con le funi di guardia sia con altre linee trifase. L'analisi matriciale per lo studio degli attraversamenti si estende fino alle stazioni d'estremità interessate, che sono caratterizzabili per mezzo di dati forniti dal Gestore della Rete di Trasmissione Nazionale e da TERNA S.p.A.

Per impostare il calcolo delle correnti di corto circuito è necessario introdurre un gran numero di dati (precisa tipologia dei conduttori, loro distanze mutue e altezze rispetto il terreno, distanze del corto circuito dalle stazioni di estremità della linea e potenzialità delle stazioni stesse) che per brevità non vengono qui riportati.

Per completare la casistica, oltre agli eventi nei quali l'impianto a fune F viene coinvolto da un incidente su una sola fase (v. fig. 3 a), vanno ricordati, come possibili, altri tipi di corto circuito, in cui intervengono più fasi, che possono provocare iniezioni di correnti più elevate (v. fig. 3 b) e 3 c)).

Si noti che il caso di fig. 3 b) rappresenta un'evenienza con probabilità confrontabile a quella del caso di fig. 2: infatti lo stesso abbassamento del conduttore 1 per la rottura dell'amarraggio OB (v. fig. 4) che provoca un corto circuito "fase 1-fune funiviaria-terreno", comporta contestualmente una sovratensione rispetto a terra (sulle fasi sane) che può portare la fase 2 a scaricare sul traliccio S, collegato a terra sia direttamente sia tramite le funi di guardia fg. Per contro il caso di fig. 3 c) è da escludere dalla casistica perché estremamente improbabile e viene riportato solo per completezza di trattazione.

In tab. 3 le correnti subtransitorie di corto circuito riguardanti l'attraversamento # 2 e calcolate per i casi di fig. 3 forniscono un quadro esaustivo in considerazione della modesta dissimmetria strutturale delle linee trifase: pertanto il caso b) risulta assai importante e significativo, dato che il caso c) è assai improbabile e comporterebbe comunque correnti di poco superiori.

#	Denominazione Funivia	Linea elettrica sovrapassante	U_N [kV]	Tipo Linea	Distanza minima conduttore–fune [m]	Corrente di corto circuito subtransitoria [KA eff.]
1	Piccolo San Bernardo Belvedere	Albertville Rondissone	380	Doppia terna Trinata	7.2	15.2
2	Malcesine Monte Baldo	S. Massenza Bussolengo	220	Doppia Terna	5.8	13.1
3	Aosta Pila	Villeneuve Chatillon	220	Singola Terna Binata	17.0	13.8
4	Malcesine Monte Baldo	S.Massenza Torbole-Sandrà	220	Doppia Terna	//	//
5	Predazzo Gardonè	Predazzo Moena	132	Singola Terna	//	7.1
6	Valtournenche Salette	Maen Perreres	132	Singola Terna	9.6	7.0
7	San Martino Col Verde	Arson Cavia	60	//	//	//
8	Malga Mezzania Fortino	//	20	//	//	//

Tab. 2 Sovrappassi linee aeree — impianti a fune nella Regione Val D Aosta e nella Provincia di Trento

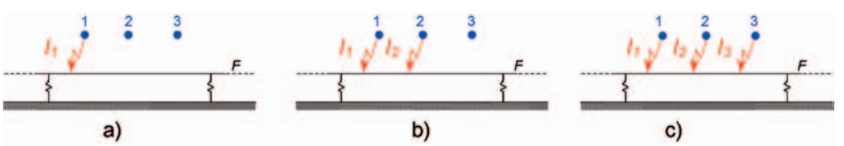


Fig. 3 Casistica dei guasti linea elettrica — impianto F

s22_27_isr6_04 30.09.2004 11:46 Uhr Seite 4

Anche l'analisi sistematica ed accurata per gli altri attraversamenti situati in Val d'Aosta e in Trentino Alto Adige porta a ritenere il caso b) come il più gravoso prevedibile (v. ultima colonna in tab. 2). Per snellire l'esecuzione delle indagini sperimentali su diversi spezzoni di F, si è deciso di adottare sempre la corrente subtransitoria pari a 15 kA eff. e di imporre cautelativamente che essa fluisca interamente sulla fune senza la ripartizione che in realtà subisce in F (v. fig. 4).

Come noto, oltre alla componente subtransitoria simmetrica sinusoidale, si è introdotta anche la massima componente unidirezionale prevista dalle Norme4 citate per quanto, nella fattispecie, non incida particolarmente sul valore efficace responsabile del surriscaldamento.

Tipo di corto circuito	I_1	I_2	I_3
Caso a)	8.8	0	0
Caso b)	13.1	12.9	0
Caso c)	13.8	14.8	14.1

Tab. 3 Moduli [kA] delle correnti subtransitorie di corto circuito (a 50 Hz) nelle fasi 1, 2, 3 ottenuti nell'attraversamento # 2 tramite gli algoritmi multiconduttore

Si noti che i due sovrappassi #7, 8 di linee aeree in media tensione non sono stati presi in considerazione poiché, essendo la rete di distribuzione MT esercìta a neutro isolato (o a terra tramite bobina di Petersen), le correnti di guasto a terra risultano irrilevanti.

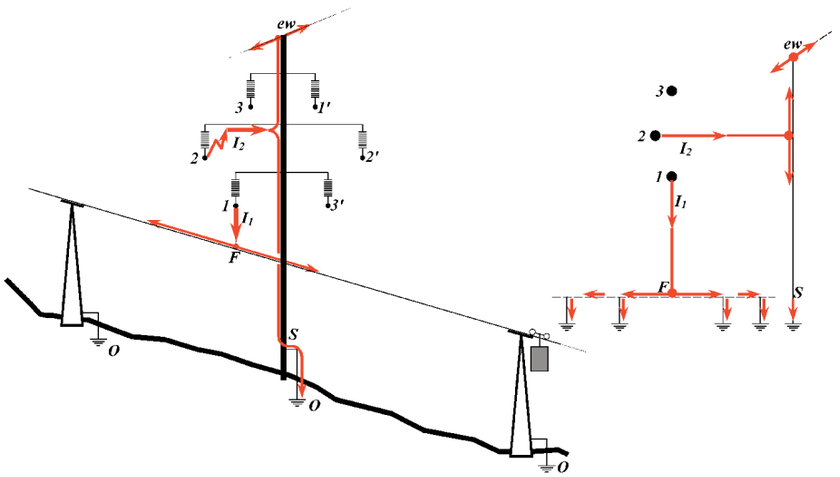
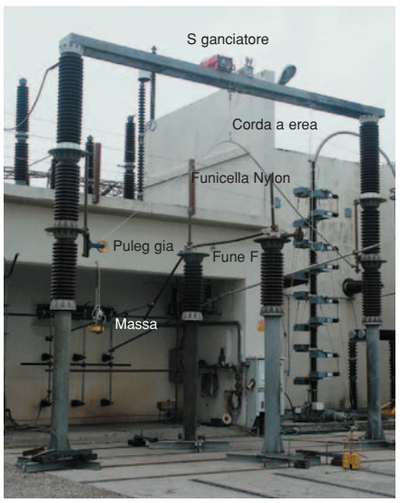


Fig. 4 Rappresentazione schematica dei percorsi delle correnti di guasto per corto circuito fase1-fase2-terra nel caso dell'attraversamento Malcesine — Monte Baldo

# PROVA	TIPO di PROVA	Fune FUNIVIARIA in PROVA
1	DINAMICA	chiusa Φ=55 mm
2	DINAMICA	trefoli Φ=26 mm
3	DINAMICA	trefoli Φ=40 mm
4	STATICA a CONTATTO	trefoli Φ=40 mm

Tab. 4 Tipi di Prove



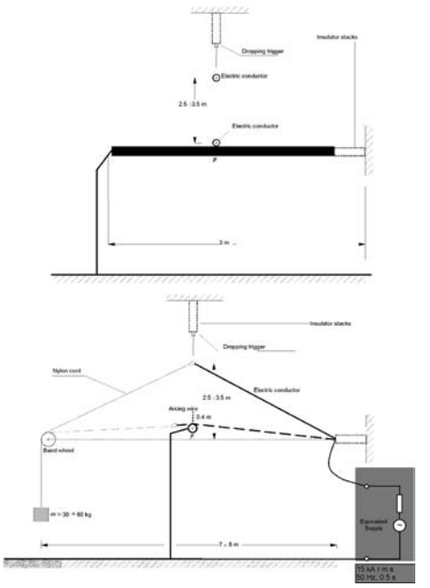


Fig. 5 Allestimento per le indagini sperimentali elettriche presso il Laboratorio SVEPPI

3. Indagini sperimentali e verifiche meccaniche a rottura

Dai risultati precedenti si sono desunti i parametri fondamentali (intensità di corrente, tempi di durata sia della fase d'arco sia della successiva fase di contatto) che sono stati riprodotti nel circuito per l'indagine sperimentale allestito presso il Laboratorio SVEPPI (v. fig. 5). Dal momento in cui viene comandato lo sganciatore, la corda aerea è libera di cadere sotto l'azione congiunta della forza di gravità e del tiro dovuto alla massa m e quando arriva alla distanza di 40 cm dalla fune funiviaria incontra il dispositivo d'innesco (un filo di rame con sezione molto piccola) che dopo essersi istantaneamente volatilizzato fa scoccare l'arco elettrico: l'arco va man mano accorciandosi fino all'urto della corda aerea (tratteggiata) sulla fune F, così che alla conduzione d'arco segue il contatto metallico più o meno efficiente (v. descrizione in § 1). Questa prova è denominata DINAMICA in tab. 4. Il circuito consente così di conseguire i valori voluti per i parametri di ciascuna prova (durata d'arco, durata di contatto e intensità di corrente di corto circuito).

È stata anche effettuata una prova con la corda aerea già a contatto con la fune funiviaria F senza le fasi di caduta e arco (in tab. 4 denominata prova Statica a contatto).

La tab. 4 riporta inoltre i dati nominali delle funi funiviarie in prova. Si noti che la prova #1 è stata eseguita su una fune del tutto simile alla fune della funivia Malcesine – Monte Baldo.

Gli spezzoni sottoposti a prove sono stati poi inviati al laboratorio LA.T.I.F. che ha eseguito sia una verifica a vista dei danni subiti sia prove di strappo per determinare la riduzione di resistenza meccanica.

Nelle ispezioni si sono riscontrati danni abbastanza trascurabili sulla superficie delle funi: alcuni fili rotti, altri con lievi alterazioni superficiali causate da surriscaldamento (arco migrante e contatto strisciante) (v. fig. 6). Per contro i risultati delle prove a strappo (v. tab. 5) mettono in luce, riguardo al carico di rottura, significative riduzioni: dal 20 % (caso #1 - fune chiusa) al 56 % (caso # 4 - fune a trefoli F = 40 mm), che il semplice esame a vista non indurrebbe a sospettare.

In particolare si riportano in fig. 7 i diagrammi carico-allungamento (prova # 1) per una fune chiusa (integra e dopo corto circuito). Dal confronto tra i due andamenti si possono desumere le seguenti osservazioni:

s22_27_isr6_04 30.09.2004 11:46 Uhr Seite 5

Fig. 6 Danni visibili riportati dalle funi nelle quattro prove sperimentali

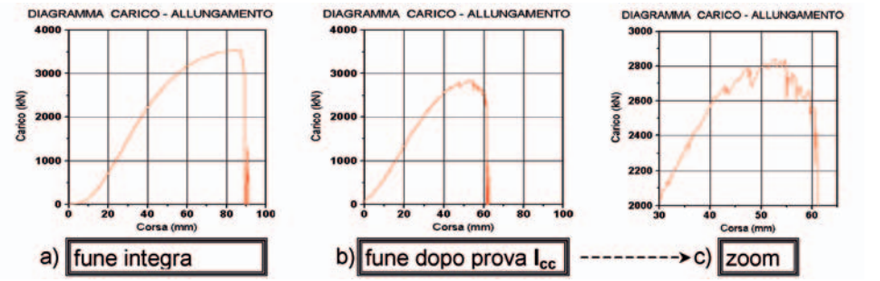


Fig. 7 Diagrammi carico-allungamento per la fune chiusa fl = 55 mm, # 1 (Laboratorio LA.T.I.F.)

- per la fune integra, l'andamento della curva carichi/allungamento (v. fig. 7 a) è quello classico previsto per questo tipo di fune, progressivo e regolare fino a rottura, indicando così buona distribuzione di carico sulla totalità dei fili ed uniformità di carico nell'intera sezione;
- per la fune danneggiata (v. fig. 7 b), la "frastagliatura" della curva, evidenziata nel grafico di fig. 7 c), è dovuta alla continua progressiva rottura di fili: dapprima di quelli che sono stati interessati dalla scarica, poi degli altri con effetto a "cascata", in quanto sottoposti a carico non uniforme e dinamico per le brusche variazioni dello stesso: il risultato finale è la penalizzazione del carico di rottura globale. L'esame a vista della zona di rottura dei fili sagomati evidenzia strizione limitata.

Analoghe osservazioni si possono formulare anche per le altre prove.

Si noti sulla superficie di frattura del fili interessati direttamente dalla scarica una zona brillante, uniforme (v. fig. 8), in cui si è innescata una classica rottura di tipo fragile; si può ipotizzare che il forte riscaldamento localizzato e il susseguente brusco raffreddamento abbiano innescato nell'acciaio dei fili periferici una trasformazione strutturale (da ferrite a martensite). Tale struttura se da un lato aumenta la durezza dell'acciaio, dall'altro lo rende estremamente fragile riducendone la capacità d'allungamento.

Fig. 8 Particolare della superficie di frattura di fili interessati da sovrariscaldamento (dopo la prova di rottura)

TEST	Nominal Diameter (mm)	Actual Diameter at 10 % of the safe working load (mm)	Tensile Strength (kN)		Reduction coefficient of tensile strength (b-a)/b (%)
			"with" electrical test a	"without" electrical test b	
Test 1 ***dynamic*** Locked coil wire rope n° 114091	55	55,9	**2840**	**3535**	**19,7**
Test 2 ***dynamic*** Warrington-seale wire rope + PCC n° 114093	26	27,6	**210**	**452**	**53,5**
Test 3 ***dynamic*** Warrington-seale wire rope + PCC n° 114095	40	42,6	**759**	**1195**	**36,5**
Test 4 ***static*** Warrington-seale wire rope + PCC n° 114097	40	42,6	**525**	**1195**	**56,1**

Tab. 5 Coefficienti di riduzione del carico di rottura per le funi sottoposte a corto circuito

4. Conclusioni

Numerosi sono nel parco nazionale ed europeo degli impianti a fune i casi di linee elettriche a vari livelli di tensione che sovrappassano gli impianti stessi. La caduta (sia pure poco probabile ma da prendere responsabilmente in considerazione) di un conduttore elettrico ad alta o altissima tensione sulla fune o sulle funi degli impianti di risalita rappresenterebbe un fatto traumatico oltre che per gli utenti anche per l'impianto sia per le azioni meccaniche in gioco sia per l'effetto dell'arco elettrico che, sviluppandosi, con correnti assai intense, tra conduttore e fune, porta ad un possibile danneggiamento della fune stessa.

Il presente studio è stato finalizzato alla valutazione del danneggiamento della fune per il sovrariscaldamento provocato dal corto circuito conduttore-fune, non essendosi reperita nella letteratura tecnica alcuna valutazione a riguardo. In particolare dalla sperimentazione elettrica si attendevano precise risposte in ordine al pericolo di collasso dell'impianto con conseguenze catastrofiche. I risultati emersi presso il laboratorio LA.T.I.F. dimostrano che gli eventi elettrici considerati (aventi peraltro probabilità di accadimento molto bassa) e riprodotti in sede sperimentale comportano sempre un danneggiamento grave della fune interessata dalla sovracorrente, per la quale si impone comunque la sostituzione, ma non provocano il collasso dell'impianto (effetto catastrofico) in quanto i residui gradi di sicurezza ne garantiscono ancora la stabilità.

Si noti che l'eventualità studiata riveste ben maggiore importanza di quella imputabile ad una fulminazione diretta di una fune funiviaria. Infatti, sebbene le correnti di fulmine possano presentare intensità di cresta anche 20 volte maggiori di quelle di corto circuito a 50 Hz, esse hanno durate tipiche 5000 volte più brevi, mettendo così in gioco possibilità di danno molto ▶

s22_27_isr6_04 30.09.2004 11:46 Uhr Seite 6

"Official supplier" dei Mondiali di sci nel 2005 a Bormio

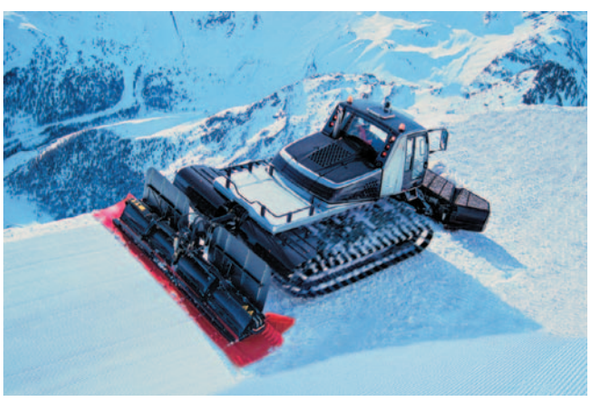
Prinoth per la più importante manifestazione sciistica dell'anno venturo si è potuto assicurare il ruolo di preparatore ufficiale delle piste.

I prossimi Campionati Mondiali di sci si svolgeranno a Bormio dal 29 gennaio al 13 febbraio 2005. Per gli organizzatori, che contano su 100.000 pernottamenti in regione, i Campionati Mondiali devono essere tutti nel segno della tecnologia innovativa. Pertanto i punti strategicamente importanti lungo le piste delle competizioni vengono già anticipatamente dotati dei più aggiornati apparecchi di trasmissione e collegati tra loro – con o senza cavo –. Tutte le informazioni sui Mondiali, tutte le corse e tutti gli aspetti degni di nota diventeranno accessibili 24 ore su 24 a tutti gli appassionati del mondo tramite telecamera e world wide web. Anche per quanto attiene la scelta dei fornitori dei vari servizi si è avuto riguardo al know how tecnologicamente più attuale. Prinoth con la sua innovativa tecnologia di veicoli da neve ha potuto assicurarsi l'incarico di "official supplier".

Per Hubert Schaller, amministratore delegato della Prinoth, l'incarico rappresenta un riconoscimento dell'elevato livello di Prinoth relativamente alla qualità delle piste ed all'affidabilità. "Prinoth già ai Mondiali del 2003 a St. Moritz era presente come official supplier. Già allora le nostre attrezzature avevano cooperato per lo svolgimento senza intoppi delle competizioni mondiali. Anche a Bormio quasi una dozzina di macchine con argano e standard, dei tipi Leitwolf ed Everest Power, garantiranno piste perfettamente preparate – affinché gli sciatori di classe mondiale delle specialità di discesa, slalom speciale, slalom gigante, super-G e combinata possano trovare in ogni momento e con ogni tempo condizioni di corsa favorevoli e di prima categoria."

Per un'impresa, che con i suoi più recenti dati di vendita ha raggiunto un record, l'acquisizione del contratto, che consente a Prinoth un'attiva partecipazione ai Mondiali di sci, costituisce un'ulteriore conferma della via intrapresa ed una buona occasione per presentare all'opinione pubblica mondiale che si interessa di sport le possibilità della tecnologia innovativa di Prinoth.

Prinoth Everest con argano e ....



... Prinoth Everest senza argano

Fotos: Prinoth

inferiori come del resto controlli periodici di esercizio hanno potuto confermare.

Considerata la mancanza totale di riferimenti in letteratura tecnica, tale studio può essere considerato un primo importante contributo verso la comprensione dei fenomeni elettro-termici e metallurgici provocati dai corto circuiti tra linea aerea sovrappassante e fune funiviaria.

5. Bibliografia

[1] R. Benato, A. Paolucci: Flussi di potenza in sistemi multiconduttore a struttura dissimmetrica. Un programma per PC, L'Energia Elettrica, Vol. 77, N°. 6, novembre–dicembre 2000, sintesi a pag. 43, articolo in sito Web: www.aei.it/ee–online.html, pp. 43–53.

[2] R. Benato, A. Paolucci , R. Turri: Power Flow Solution by a Complex Admittance Matrix –Method, European Transactions on Electrical Power – ETEP, Vol. 11, N° 3, maggio–giugno 2001, pp. 181–188.

1 Regolamento di esecuzione della legge 28 giugno 1986, n.339 (Decreto Ministeriale 21 marzo 1988; Supplemento della Gazzetta Ufficiale n.79 del 5 aprile 1988)

2 Laboratorio SVEPPI Nuova Magrini Galileo - Scorzé (VE)

3 Laboratorio Tecnologico Impianti a Fune LA.T.I.F. - Provincia Autonoma di Trento – Ravina (TN)

4 Vedi CEI 11.25 "Correnti di corto circuito nei sistemi trifase in corrente alternata".

5 Il tempo di eliminazione di guasti a terra, in presenza di dispositivi di richiusura automatica, è definito come somma dei tempi di permanenza della corrente di guasto durante un ciclo di richiusura (O-C-O); v. Norme CEI 11-1 § 9.2.4.