

N° *Severino-02*
I.M.
8.3.53

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI CAGLIARI
FACOLTA' DI INGEGNERIA

M. GHIANI - P. PIGA

DISPENSE DI IMPIANTI MINERARI

ERRATA

CORRIGE

pag. 2	riga 27
" 14	" ultima
" 23	" 3
" 32	" terz'ult.
" 48	" 21
" 67	" 30

considerazione.
una armatura
si giunge
le norme italiane di polizia
fossici
può innescare l'accensione del
grisù

considerazioni.
una armatura
si giunse
tossici

G. R. U. C.

LIBRERIA UNIVERSITARIA CAGLIARITANA EDITRICE

ANNO ACCADEMICO 1963 - 1964

PARTE TERZA

L'ELETTRIFICAZIONE DELLE MINIERE

Generalità

L'incremento del consumo di energia elettrica in miniera è stato, in questi ultimi anni, elevatissimo. Tutte, o quasi, le macchine di miniera possono ormai essere direttamente elettrificate, o alimentate da compressori elettrici di fondo. La elettrificazione integrale, con conseguente soppressione della rete generale di distribuzione dell'aria compressa, sembra ormai possibile, ed in qualche caso è già stata realizzata (miniere di ferro della Lorena, miniere di sali potassici d'Alsazia), ma non sembra ancora la soluzione tecnicamente ed economicamente più conveniente nella generalità dei casi.

E' opportuno dunque, prima di precisare l'attuale campo di applicazione della elettrificazione in sotterraneo, esaminare i fattori che favoriscono od ostacolano l'elettrificazione integrale, dando qualche indice dei risultati attualmente acquisiti, nonché i valori che devono essere ritenuti più soddisfacenti, allo stato attuale. Esamineremo quindi rapidamente i caratteri specifici dell'elettrificazione in sotterraneo ed il problema dell'elettrificazione nei riguardi della sicurezza.

Lo sviluppo dell'elettrificazione in miniera è dovuto ad un certo numero di fattori favorevoli:

- 1) il più importante, senza dubbio, è lo sviluppo stesso della meccanizzazione. L'aumento del numero delle macchine, in uno con la loro potenza unitaria, è divenuto tale che la loro alimentazione con aria compressa è praticamente irrealizzabile;
- 2) La concentrazione dei lavori agisce nello stesso senso, soprattutto perchè si tende ad ottenere tale concentrazione non più mediante la concentrazione del personale, ma con l'aumento della potenza delle macchine e dei mezzi di abbattimento e produzione;
- 3) un argomento spesso decisivo, e che dà luogo alla sostituzione dell'aria compressa con l'energia elettrica, è il forte vantaggio economico che si ottiene con l'uso di quest'ultima. Il rapporto tra i costi varia da 1/8 a

1/12 ed è dovuto principalmente alle diversità di rendimento delle varie parti che compongono gli impianti di distribuzione, produzione ed utilizzazione. Esaminando due circuiti di distribuzione, rispettivamente ad aria compressa e ad energia elettrica, possono scontarsi, per le varie parti che compongono i circuiti stessi, i seguenti rendimenti:

Circuito ad aria compressa

Circuito elettrico

Trasporto ener. elettr. sino al compressore.....	0,90	Trasporto energia elettrica all'esterno.....	0,90
Rendimento di compressione..	0,70		
Rendim.del motore elettrico.....	0,96		
Rendimento meccanico.....	0,97		
Rendimento di trasmissione aria compr.al fondo.....	0,50	Trasp.energia elettrica nel sottosuolo.....	0,90
Rendim.motori ad aria compressa.....	0,20	Rendimento dei motori elettrici.....	0,85
			<hr/>
Rendimento complessivo.	0,06		0,69

Il vantaggio dell'energia elettrica dal punto di vista economico è tanto più importante se si pensa che il consumo di energia specifica utile, a tonnellata prodotta, ha una forte tendenza ad aumentare;

4) infine i progressi tecnici recenti, intervenuti nella costruzione e concezione del materiale elettrico di miniera, facilitano il suo sviluppo; fra questi progressi citiamo lo sviluppo dei trasformatori di cantiere sotto forma che facilitano il loro impiego vicino ai luoghi di utilizzazione, il miglioramento dei dispositivi di controllo e di comando e, in generale, delle caratteristiche dei motori.

Tuttavia, come abbiamo già accennato, certe considerazioni, che hanno sovente importanza locale, possono ostacolare l'elettrificazione, ad esempio:

1) certe condizioni geologiche sfavorevoli, come l'irregolarità di certi giacimenti, che impongono l'adozione di metodi di coltivazione poco favorevoli

ad una intensa meccanizzazione;

- 2) la presenza di grisù nei lavori, è un ostacolo, talvolta insormontabile allo stato attuale, per l'elettificazione; esso può essere superato migliorando le condizioni di ventilazione con ventilatori elettrici al fondo, effettuando un accurato degasaggio e cercando di realizzare grisumetri più precisi che permettano di ridurre il margine di sicurezza, imposto dai regolamenti di Polizia Mineraria, per il tenore in grisù accettabile in cantiere;
- 3) una eccessiva temperatura dei cantieri, che si riscontra più frequentemente con l'approfondirsi dei lavori, non è favorevole all'elettificazione. La conversione in calorie delle perdite in kwh, dà luogo praticamente ad un aumento di temperatura, nei cantieri interessati, di 1-2°C. Se si pensa che per effetto appunto della profondità molte miniere si trovano già di fronte a gravi difficoltà, dal punto di vista temperatura, e che i regolamenti di Polizia Mineraria prescrivono di non superare un certo limite (in Italia, 32° C, misurati con termometro a bulbo asciutto), si capisce come il calore addizionale dovuto all'elettricità possa aggravare la situazione sino a far sorpassare il limite critico di cui si è detto. Fortunatamente si dispone di qualche mezzo per rimediare al grave inconveniente: miglioramento della ventilazione con ventilatori ausiliari di fondo e ventilatori secondari più potenti, messa in opera di installazioni di refrigerazione e comunque di climatizzazione, e, soluzione preconizzata recentemente, adozione di una ventilazione discendente, in modo che l'aria arrivi ai cantieri prima di attraversare le gallerie più profonde, quelle in cui si ha maggior numero di motori elettrici installati e quelle in cui il carbone abbattuto cede molte calorie all'aria ambiente; sfortunatamente l'adozione di quest'ultima soluzione urta contro prescrizioni imposte dai regolamenti di Polizia Mineraria, che, in certi casi, impongono l'adozione di una ventilazione ascendente, imposizione dettata da considerazioni di carattere igienico e soprattutto di sicurezza;
- 4) anche la necessità di adottare metodi di coltivazione con ripiena pone un ulteriore problema per l'elettificazione, soprattutto per la notevole diffusione della ripiena pneumatica nel corso di questi ultimi anni, ripiena pneuma-

tica che richiede grossi consumi di aria compressa. I metodi di ripiena che utilizzano ripienatrici meccaniche, che possono essere elettrificate, non si sono sviluppati, perchè essi esigono l'adozione di un nastro trasportatore in cantiere, mentre è noto che i moderni metodi di abbattimento e caricamento fanno il più sovente appello a trasportatori a catena corazzati; l'uso di ripienatrici meccaniche obbliga allora ad adottare due trasportatori in taglio, soluzione molto rara e poco conveniente;

- 5) infine non bisogna trascurare, come fattore che si oppone alla elettrificazione integrale di una miniera, la possibilità di migliorare la distribuzione dell'aria compressa. Tale miglioramento può conseguirsi realizzando centrali d'aria compressa comuni ad un gruppo di miniere importanti (guadagno sul prezzo di costo dell'ordine del 30%) e prendendo tutte le misure atte a ridurre le fughe, nonchè effettuando una essiccazione efficace della aria all'uscita dei compressori, sicchè i motori al fondo possano lavorare con rendimenti più elevati.

Tenendo presenti tutti i fattori ora elencati pro e contro l'elettrificazione, è facile stabilire quale parte assuma l'elettricità nelle varie fasi della coltivazione.

Tralasciando il problema dell'eduazione, in cui le pompe sono sempre azionate da motori elettrici (la cui potenza sorpassa in qualche caso 1500 kw), esamineremo in particolare le seguenti fasi: abbattimento, ripiena, trasporti continui, trasporti su rotaia, perforazione, illuminazione e segnalazioni.

1) Abbattimento - Le macchine moderne, concepite per la meccanizzazione contemporanea dell'abbattimento e del caricamento, sono tutte grandi consumatrici di energia. L'alimentazione con energia elettrica è per esse indispensabile ed anzi il loro sviluppo è proprio dovuto alla possibilità di poter usufruire, con questa forma di energia, di potenze notevoli. Così sono state elettrificate tutte le tagliatrici e tutti i tipi di tagliatrici-caricatrici, la cui potenza unitaria può raggiungere i 120 kw (ad esempio col minatore continuo), ed i convogliatori corazzati a catena (di cui si conoscono installazioni con 4 motori da 40 kw).

All'abbattimento solo le macchine a percussione rimangono tributarie dell'aria compressa, e ciò malgrado gli sforzi che tendono alla messa a punto, di martelli elettrici. La loro importanza va però diminuendo gradatamente con il progressivo sviluppo delle altre macchine di abbattimento e, comunque, essi possono essere alimentati facilmente mediante compressori di cantiere, alimentati, a loro volta, elettricamente, sicchè vengono eliminate le lunghe reti di tubazioni comportanti notevoli perdite di energia.

2) Trasporti continui - Nel campo dei trasporti continui, l'elettricità si impone facilmente. Per i convogliatori a nastro collettori principali, la potenza dei motori raggiunge oggi, spesso, il valore di 300 CV, ma i continui progressi tecnologici nella costruzione delle tele costituenti l'ossatura resistente del nastro stesso fanno prevedere valori della potenza installata di gran lunga superiori: ad esempio, l'uso di tele ad armatura metallica dovrebbe permettere l'adozione di teste motrici di potenza sino a 1500 CV.

Per contro, si ha una certa esitazione ad elettrificare i canali oscillanti, a causa delle dimensioni e del peso delle teste motrici elettriche, in convenienti che si risentono negli spostamenti frequenti a cui sono soggetti questi canali. Non bisogna inoltre trascurare l'alto costo dei gruppi elettrici, tenendo conto che bisogna prevedere l'ammortamento in un tempo piuttosto breve (5 anni), dato il rude uso cui vanno incontro in miniera. L'apparizione piuttosto recente di teste motrici elettroidrauliche permetterà forse di trovare una più vantaggiosa soluzione al problema dell'elettrificazione dei canali a scosse, il cui numero, sebbene tenda a diminuire, resta ancora elevato.

3) Trasporti su rotaia - In questo campo, i locomotori a trolley, forniscono certamente la soluzione più economica del problema, almeno per quanto riguarda i trasporti principali. L'uso di questi locomotori urta però contro prescrizioni severissime a causa dei rischi di elettrocuzione cui si va incontro e contro l'impossibilità di usarli in miniere grisutose. Il grande sviluppo dei locomotori ad accumulatori è appunto dovuto a queste cause in uno con i notevoli progressi intervenuti nella costruzione delle batterie.

4) Perforazione - Malgrado i progressi della perforazione rotativa, i martel

li perforatori conserveranno ancora indubbiamente, e forse per parecchio tempo, un posto preponderante nella perforazione. L'alimentazione di queste macchine può essere effettuata con compressori di cantiere. Un compressore da 80 CV, ad esempio (9 mc/min), permette di far lavorare contemporaneamente 2 macchine di media potenza. L'uso di questi compressori di cantiere impone però talvolta ulteriori problemi, quale la necessità, per un buon funzionamento degli stessi, di attivare la ventilazione nei punti in cui essi sono installati.

5) Illuminazione, segnalazioni e installazioni di comando - L'uso dell'energia elettrica permette di migliorare ed estendere l'illuminazione delle gallerie. Va estendendosi anche l'illuminazione in cantiere, già realizzata in modo spinto in certi bacini, sebbene i progressi raggiunti con le lampade portatili individuali limiti molto questa tendenza. L'uso dell'energia elettrica ha inoltre permesso installazioni telefoniche che collegano tutti i punti della miniera, sia a giorno che al fondo, esso ha inoltre permesso la realizzazione di schemi di segnalazione molto vari, sia acustici che luminosi, di controllo e di comando automatico.

Allo stato attuale è anche possibile dal punto di vista tecnico, sebbene poco conveniente dal punto di vista economico, elettrificare piccole installazioni normalmente alimentate da aria compressa, come ad esempio, i comandi di ingabbiamento per spingitori, freni, porte d'aerazione, etc.... mediante apparecchi elettrici, elettroidraulici ed elettropneumatici. L'importanza di tale possibilità va valutata nella misura in cui essa può condurre alla soppressione della rete di distribuzione d'aria compressa.

Lo sviluppo dell'elettrificazione di una data miniera può essere facilmente seguito, tracciando la curva in funzione del tempo di una caratteristica qualunque, ad esempio, la potenza installata sotto forma di trasformatori o di motori, o il consumo di energia, in valore assoluto o in rapporto all'estrazione (kw/tonn giorno oppure kwh/tonn giorno).

Con questi indici è tuttavia difficile stabilire paragoni fra miniera e miniera o fra bacino e bacino, a tale scopo meglio si presta il grado di elettrificazione, rappresentato dal rapporto percentuale tra la potenza motrice e

lettrica installata e la potenza totale delle macchine esistenti. Il grado medio di elettrificazione delle miniere europee è mediamente compreso fra il 30 e il 40%, esclusa l'eduazione (50-60% compresa l'eduazione), ad eccezione delle miniere inglesi che già nel 1954 raggiungevano un grado di elettrificazione di circa il 75 %. Studi recenti mostrano che, per i bisogni attuali della maggior parte delle miniere europee, sono sufficienti potenze specifiche installate dell'ordine di 2 kwh/ton.g. con gradi di elettrificazione dell'ordine del 50%, esclusi l'eduazione ed il trasporto elettrico.

Prima di parlare della elettrificazione nei riguardi della sicurezza, sarà bene elencare alcuni caratteri specifici dell'elettrificazione in sotterraneo. Tali caratteri riguardano il tipo di corrente usata, la scelta della media e della bassa tensione e dei modi di distribuzione dell'energia elettrica.

Per quanto riguarda il tipo di corrente usata, l'alternativa risiede nella scelta fra corrente continua e corrente alternata.

Contrariamente a quanto avviene in America, in Europa, l'uso della corrente continua è stato escluso, e ciò per le diverse condizioni delle miniere dei due continenti. In U.S.A., le miniere cominciano quasi sempre con l'installare la trazione a trolley, quindi si estende la rete in corrente continua della trazione alle applicazioni della meccanizzazione. Ciò è possibile in U.S.A. grazie alle condizioni favorevoli di quei giacimenti, attualmente coltivati a debole profondità, questo e l'assenza quasi generale di terreni acquiferi, permette di effettuare fori di sonda attraverso cui si fanno passare i cavi elettrici che partono dalla stazione di conversione posta all'esterno. In Europa, ove i giacimenti sono situati a notevole profondità, e dove un pozzo deve essere sfruttato al massimo (si calcola che il raggio medio d'azione di un pozzo d'estrazione sia di 6 km) sarebbero state necessarie stazioni di conversione al fondo mobili per seguire i cantieri nel loro avanzamento, con costi di manutenzione notevolmente superiori di quelli di una sottostazione di trasformazione in corrente alternata.

Inoltre, i cantieri europei delle miniere di carbone, richiedono in genere, materiale antigrisutoso, che in corrente continua è di più difficile costruzione (per la presenza dei collettori) dell'analogo materiale in corrente

alternata. Naturalmente la trazione è rimasta alimentata da corrente continua, con rete separata dalla rete di alimentazione delle altre utilizzazioni.

Per quanto riguarda la scelta della media tensione, la necessità, tanto più sentita, quanto più i cantieri si allontanano, di mantenere la sezione dei cavi entro valori economici, ha fatto fissare la tensione di trasporto in sotterraneo sui 5000 - 5500 Volts.

Con questa tensione vengono alimentati i grossi motori delle pompe di eduazione e dei nastri trasportatori in vicinanza del pozzo. Ma la tendenza attuale è quella di non fissare valori massimi, in modo da consentire tensioni più elevate, con isolamenti migliorati.

La bassa tensione ha un valore fissato dai regolamenti di Polizia Mineraria, ma anche per essa vale la tendenza a non fissarne il valore. Il regolamento inglese prevede, come massimo, 660 Volts; quello francese, 500 Volts. La ragione della utilizzazione di tensioni così elevate è dovuta alla distanza dei trasformatori dei cantieri di utilizzazione, distanza che può raggiungere i 200 - 300 metri e che unita alle notevoli potenze in giuoco, costringe a limitare al massimo le perdite, senza dover utilizzare cavi di sezione molto grande.

La distribuzione dell'energia elettrica in sotterraneo è attuata o con il neutro a terra o con il neutro isolato o con sistema misto, come usato in Olanda, interponendo fra il neutro e la terra una notevole resistenza (100 Ohm).

A) Distribuzione con il neutro isolato -

E' applicata in Francia, Stati Uniti, Germania e, recentemente, in Inghilterra.

Per rete non difettosa, il diagramma vettoriale è riportato in figura 1, ma se una fase va completamente a terra, il punto neutro si sposta nel vertice della fase a massa, e la tensione delle due fasi sane non è più la tensione di fase ma la tensione concatenata (figura 2).

Tra questi due casi limite è situata l'avaria reale, nella quale la fase in difetto è messa a terra tramite una certa resistenza R . Il punto neutro si sposta allora secondo il diagramma di figura 3, in funzione della resi

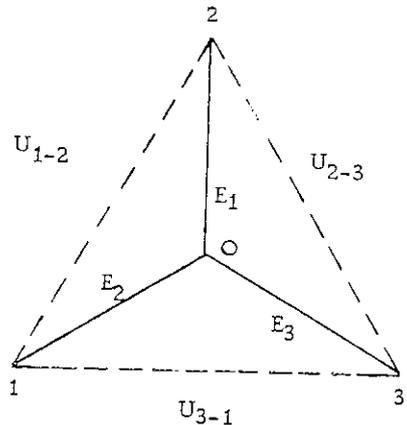


Fig. 1 - Rete perfetta

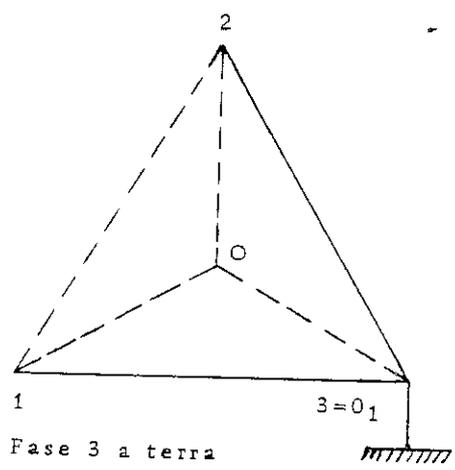


Fig. 2 - Fase 3 a terra

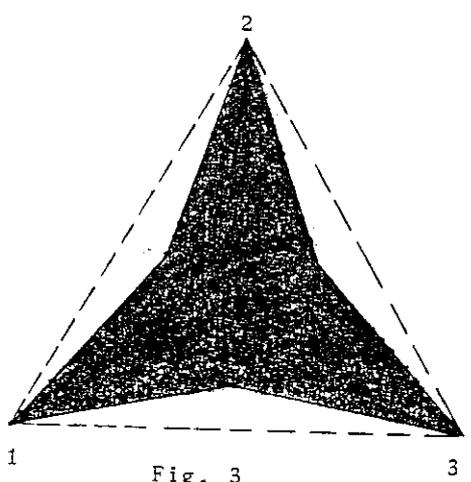


Fig. 3

stenza R , e le tensione fra le due fasi non difettose e la terra sono comprese fra quella concatenata e la tensione di fase. La messa a terra di una fase non determina nessuna corrente di fuga se le altre due fasi e il punto neutro sono perfettamente isolati, non potendosi chiudere il circuito.

In pratica, a causa dei difetti di isolamento che sempre si verificano in una rete, il circuito si chiude tramite la terra e la intensità di corrente è limitata ad un valore che risulta funzione dell'isolamento della rete, che se pure non perfetto è però notevole.

Nei riguardi della possibilità di elettrocuzione è da rilevare che difficilmente si verifica il contatto franco tra una fase e l'operaio, piuttosto questo può venire facilmente in contatto con i carter dei motori e gli involucri dei cavi messi sotto tensione dalle correnti di fuga. La tensione di tali carter è uguale al prodotto della corrente di fuga per la resistenza del circuito di terra (obbligatorio per tutte le apparecchiature usate in sotterraneo) per cui limitare le correnti di fuga vuol dire, in definitiva, limitare la tensione residua dei carter e quindi i pericoli di elettrocuzione. Tale limitazione si ottiene con un buon isolamento della rete e con la costituzione di una buona terra, come più dettagliatamente verrà esposto nelle pagine seguenti.

B) Distribuzione con neutro a terra -

Questo tipo di distribuzione è usato in Inghilterra; con essa, il

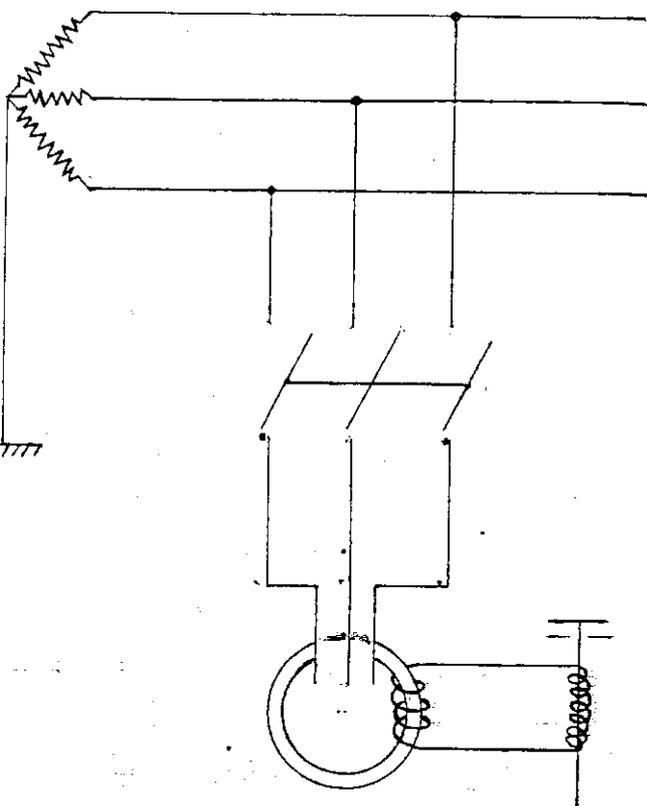
centro stella viene fissato nel punto O e non subisce più spostamenti anche se una fase dovesse andare a massa. Le tensioni fase-terra, in tal caso, saranno all'incirca sempre uguali alla tensione stellata.

Una corrente di fuga in una rete con neutro a terra si chiude attraverso il neutro ed è quindi sempre una corrente di cortocircuito, la cui intensità è solo limitata dalla resistenza del contatto fase-terra. Il pericolo è dunque notevole non solo dal punto di vista riscaldamento e quindi possibilità di incendio, ma anche dal punto di vista delle tensioni residue che si manifestano sulle carcasse.

In una rete di distribuzione con neutro a terra, dunque, è sempre necessaria l'eliminazione, la più rapida possibile, e sempre automatica, di ogni difetto di isolamento.

Il sistema di protezione maggiormente usato in Inghilterra è quello detto "Core-Balance" che si fonda sullo squilibrio delle correnti che si determina nel dispositivo quando a valle di questo è realizzata una fuga.

I tre conduttori di fase (figura 4) si avvolgono, prima della utilizzazione, su un toro magnetico, che si trova ad essere percorso da un



flusso proporzionale alla risultante delle tre correnti che attraversano i tre conduttori. Se queste sono equilibrate, la risultante è nulla e il flusso è nullo. Se una fase presenta una fuga, la risultante delle tre correnti non è più nulla, per cui nel secondario si determina una corrente che interrompe la distribuzione.

A titolo di conclusione possiamo dire che il neutro a bassa tensione isolato, con una rete di distribuzione fatta con materiale antigrisutoso e con cavi armati, quindi con possibilità di avere alto isolamento, dà un'elevata

Fig. 4

sicurezza da tutti i punti di vista, purchè si cerchi di impedire il contatto umano con una fase nuda e se naturalmente si ha un buon circuito di terra.

Se si verifica il caso eccezionale di una diminuzione sensibile di isolamento, gli apparecchi di sorveglianza di isolamento consentono di agire tempestivamente.

Il neutro a terra, anche con Core-Balance, non dà la stessa sicurezza, perchè questa apparecchiatura ha una sua inerzia, e pertanto il pericolo permane sino all'apertura del circuito perchè il relè è un'apparecchiatura delicata che potrebbe anche non funzionare.

I fautori del neutro a terra, invece, sostengono che è in pratica impossibile mantenere la sicurezza dell'isolamento in una rete di fondo e che le fughe che possono determinarsi possono, improvvisamente crescere oltre misura. E' meglio pertanto garantire la sicurezza con un'apparecchiatura quale il "Core-Balance" che può essere facilmente verificata, mentre diventa difficile la verifica dell'isolamento di tutta una rete al fondo.

Ciò che condiziona veramente tutti i problemi dell'elettrificazione in sotterraneo è la questione della sicurezza, in quanto oltre ai pericoli generici che comporta l'uso di tale forma di energia (d'altronde esaltati in sotterraneo) si creano nuovi pericoli, per il particolare ambiente ove avviene il trasporto e la sua utilizzazione.

I pericoli più temuti sono quelli di incendio, di elettrocuzione e di infiammazione del grisù.

Un incendio che si dovesse innescare nella rete di distribuzione costituita da chilometri di cavi e da numerose sottostazioni, solitamente poste in vie d'entrata d'aria ove il personale circola solo ad ore determinate e che sono perciò poco sorvegliate, non potendosi intervenire prontamente, si estenderebbe rapidamente con conseguenti forti produzioni di gas tossici, che trasportati dalle correnti di ventilazione invaderebbero i cantieri. Le conseguenze che tale incidente comporta sono dunque estremamente gravi ed il miglior modo di lotta è quello di impedire il suo sorgere.

I pericoli di elettrocuzione sono maggiori che all'aperto, sia perchè l'atmosfera di miniera satura di umidità e il rude trattamento a cui è sottopo-

sto il materiale elettrico difficilmente consentono di mantenere una rete in perfetto stato di isolamento, sia anche perchè le notevoli potenze impegnate e la lunghezza dei cavi costringono ad usare tensioni elevate in un ambiente ristretto ove i minatori, sudati e, sovente, con i piedi in acqua, possono con facilità toccare parti sotto tensione. Si cerca pertanto di usare materiali perfettamente isolati e robusti e di chiudere tutte le apparecchiature sotto tensione in carter messi a terra con particolare cura.

Nelle miniere in cui si ha presenza di grisù, la preoccupazione per i pericoli ad esso legati caratterizza in primo luogo la elettrificazione in sotterraneo. Infatti, tutte le apparecchiature che danno luogo a scintille sono suscettibili di infiammare il grisù, per cui l'uso dell'energia elettrica in queste miniere, se non convenientemente attuato, risulta molto pericoloso. D'altra parte, il vantaggio economico che si ottiene con l'elettrificazione, ne ha imposto l'uso cercando di attuare apparecchiature speciali che diminuiscano il pericolo connesso con le macchine elettriche anche in quei cantieri ove è possibile che il gas raggiunga valori pericolosi, mentre le disposizioni di Polizia Mineraria, che obbligano a controlli accurati del tenore in grisù ed impongono di tagliare la corrente quando questo gas ha superato valori limiti molto bassi, costituiscono ulteriore sicurezza nell'uso dell'energia elettrica, se, naturalmente, tutte le norme vengono scrupolosamente seguite.

La sicurezza nelle apparecchiature elettriche si è raggiunta:

- a) racchiudendo tutto il materiale elettrico in carter antideflagranti corazzati che possono resistere alla pressione che si sviluppa in seguito alla eventuale esplosione di grisù nell'interno della macchina, e studiando le aperture in modo che raffreddino sufficientemente i gas che provengono dalla esplosione interna, rendendo impossibile la trasmissione della accensione alla atmosfera circostante, se naturalmente questa dovesse contenere grisù entro i limiti di infiammabilità.
- b) Annegando completamente il materiale elettrico in un isolante (olio o isolante pulverulento solito); tale sistema è adottato per apparecchi statici che non producono normalmente scintille (scatole di giunzione, trasformatori, resistenze, etc....).
- c) Limitando l'energia ad una quantità così piccola che eventuali scintille sia

no incapaci di accendere il grisù; è il caso della "sicurezza elettrica", attuata nei telefoni, nei circuiti di comando a distanza e di segnalazione.

- d) Utilizzando apparecchiature elettriche normali solo in ambienti ove vi sia la garanzia che il grisù non possa mai inquinare l'atmosfera.

Come norme di carattere generale sono però ammesse solo le apparecchiature di cui al punto a), ma l'elevato costo di una installazione in attrezzatura completamente corazzata ha spinto i regolamenti di Edizia Mineraria dei vari stati a prevedere deroghe che consentono apparecchiature di cui ai punti b), c) e d), il cui uso però deve essere valutato di volta in volta dall'organo preposto alla sicurezza delle miniere.

CAPITOLO I°

Schema di un impianto di distribuzione di energia elettrica al fondo - I cavi elettrici di miniera

Un impianto di distribuzione di energia elettrica al fondo è costituito : (figura 6)

- dalla cabina della Media tensione posta in vicinanza della bocca del pozzo alla quale arrivano le linee di alimentazione dalle centrali di produzione.

Da qui partono le linee di alimentazione degli impianti a giorno ed i cavi a media tensione che portano l'energia in sotterraneo attraverso il

pozzo di entrata d'aria. La alimentazione in ogni livello dovrebbe essere eseguita con due cavi in modo da assicurare l'arrivo della corrente, da due vie; ciò comporta un onere rilevante per cui entro ai pozzi è preferita la distribuzione ad anello che consente oltre alla alimentazione diretta anche l'alimentazione di un livello da parte degli altri (figura 5)

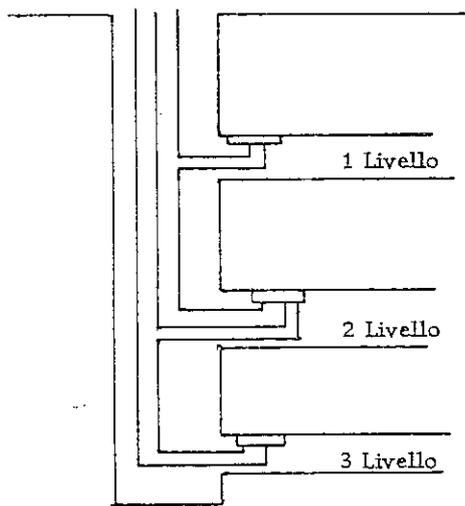


Fig. 5

I cavi che vengono scesi nel pozzo sono di solito armati, di costruzione particolarmente robusta perchè l'armatura si calcola come se dovesse sostenere tutto il peso del cavo con un coefficiente di sicurezza pari a 5 , malgrado questo venga ancorato alle armature del pozzo.

Essi sono costituiti dai 3 conduttori isolati con carta impregnata, riuniti dentro una guaina di juta e quindi ricoperti da un altro strato di carta impregnata. Il tutto è ricoperto da un involucro di piombo.

Su tale involucro si passano numerosi strati di carta asfaltata, un altro strato di juta pure asfaltata ed infine una armatura costituita da una serie

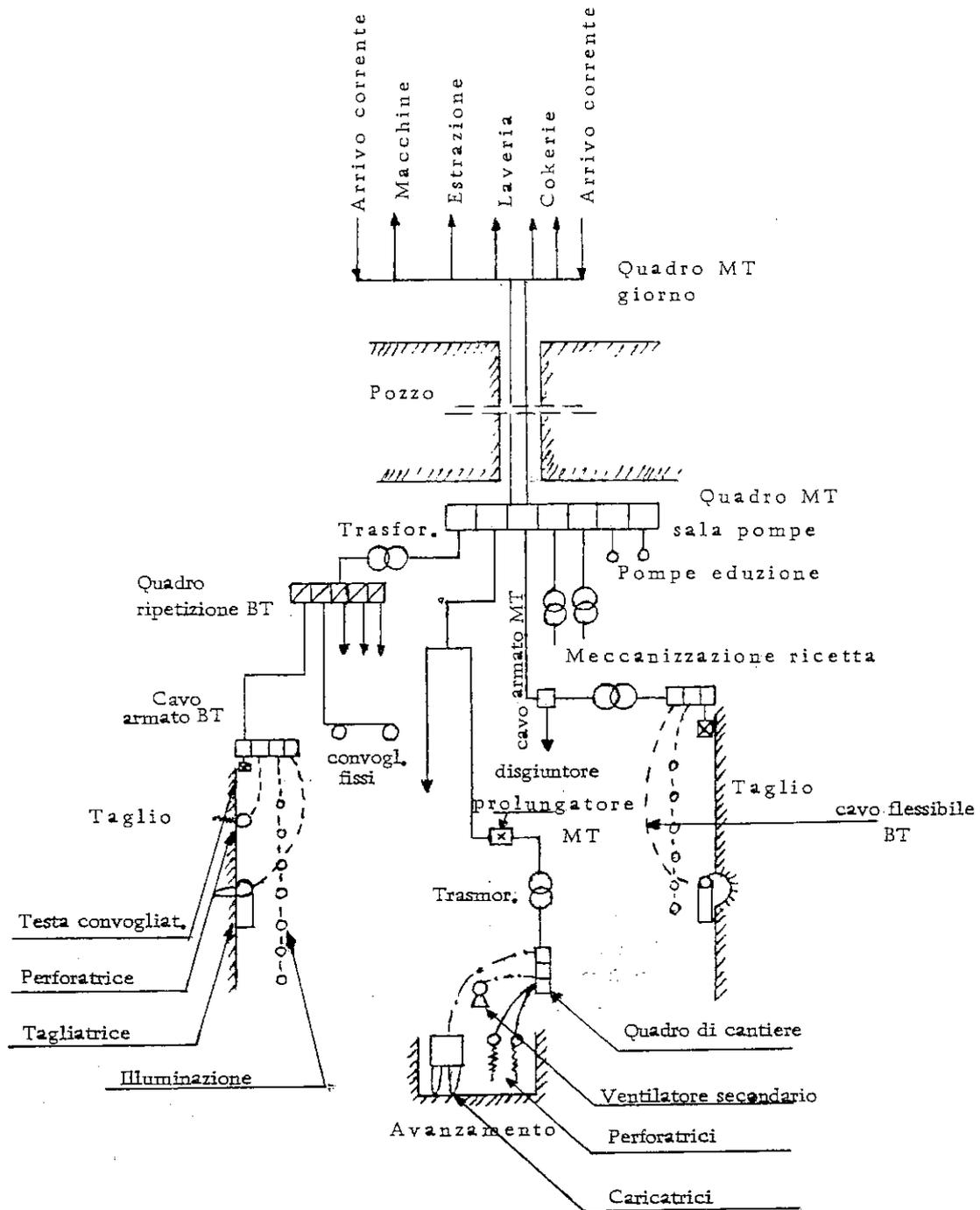


Fig. 6

di fili di acciaio il cui numero è funzione del carico che deve sopportare. A volte attorno a questa viene avvolta una spirale in lamiera per preservare l'armatura portante. I normali prodotti di impregnazione della carta non possono essere usati perchè alla temperatura di regime raggiunta dal cavo diventano fluidi e tendono a scendere verso il basso colando dalla scatola di giunzione del fondo. Si usano pertanto sostenze particolari che alla temperatura di regime del cavo risultano meno fluide di quelle normali lasciando tuttavia intorno alla carta impregnata uno spazio per fare espandere il materiale di impregnazione, che se pure speciale, cola verso il basso e potrebbe far scoppiare la guaina in piombo.

Al fondo i cavi sono collegati con un quadro di ripartizione a 5000 V posto nelle vicinanze della ricetta nella sala pompe di eduazione.

Da questo quadro, dopo essere passati attraverso interruttori automatici generalmente di costruzione non corazzata perchè in entrata d'aria, che costituiscono sicurezza contro i corti circuiti ed i sovraccarichi, partono i cavi di alimentazione delle pompe, quelli di alimentazione del trasformatore per i motori della stazione di ingabbiamento e quelli che attraverso le gallerie portano alle sottostazioni di zona o di cantiere. I cavi in galleria (alimentati a 5000 Volt) pur non essendo soggetti alle sollecitazioni meccaniche previste teoricamente per i cavi dei pozzi, perchè sostenuti almeno ogni 5 metri da appositi supporti fissati all'armamento, sono cavi armati che possono sopportare: eventuali sollecitazioni conseguenti a piccole frane, movimento delle armature alle quali sono appoggiati ed il trattamento rude da parte degli operai. I cavi di fondo, e per il ristretto spazio a disposizione e perchè sono sovente spostati, devono avere il diametro più piccolo possibile (massimo 3 x 100 o 3 x 150) e la maggiore elasticità compatibile con la rigidità della armatura. Per evitare la propagazione di incendi i cavi sono privi di quello avvolgimento esterno di juta che preserva l'armatura dei cavi usati a giorno mentre sono consigliati isolanti e riempimenti difficilmente incendiabili.

Le armature sono costituite da fili di acciaio di sezione rettangolare, posti a contatto in modo da dare una superficie esterna liscia, sostenuti da una spirale di lamiera avvolta in senso contrario. Sono anche utilizza-

te armature costituite da un doppio strato di fili di acciaio a sezione circolare con avvolgimento a spirale incrociata che pur avendo caratteristiche inferiori al rivestimento di meplats sono molto utilizzate per il loro basso costo.

La giunzione degli spezzoni dei cavi avviene con delle scatole a media tensione del tipo ordinario se il cavo è steso nelle vie di entrata d'aria e del tipo antigrisutuosio se i cavi corrono nelle vie di riflusso. Quest'ultimo tipo di giunzioni con i nuovi regolamenti non deve più avere dei giunti stagni alla fiamma nè essere sottoposto a prove di pressione; si richiede per esso:

- 1) che eviti una qualunque sollecitazione meccanica sulla giunzione elettrica;
- 2) che consenta un riempimento idoneo da parte della colata di materiale isolante;
- 3) che assicuri la continuità del circuito elettrico di terra costituito in genere dalla guaina di piombo del cavo;
- 4) che consenta un attacco facile e sicuro all'armamento e presenti un volume ridotto sporgendo il meno possibile dal cavo stesso.

I cavi a media tensione terminano nelle vicinanze dei cantieri di coltivazione nelle stazioni di trasformazione della Media tensione alla bassa tensione. Tali stazioni di trasformazione comprendono: nella Media tensione interruttori di massima del tipo antideflagrante che possono formare un blocco unico, e mobile con il trasformatore stesso. In sostituzione di tali interruttori di massima automatici si trovano nella parte media tensione o una cassa contenente dei fusibili ad elevato potere di rottura o degli interruttori che permettono di escludere il trasformatore sia a vuoto che sotto carico.

I trasformatori che vengono usati nelle stazioni di cantiere sono del tipo antigrisutoso corazzati, nei quali si è cercato di eliminare l'olio come isolante, sia perchè costituiva un pericolo latente per le possibilità di incendio sia perchè nonostante la costruzione accurata, l'umidità penetrava nel cassone dando origine ad un rapido abbassamento della rigidità dielettrica dell'olio stesso.

In un primo tempo si è cercato di sostituire all'olio un liquido isolante incombustibile quale ad esempio il "pyranol" che pur dando una maggiore garanzia di sicurezza di quella fornita dall'olio non escludeva il pericolo

di formazioni di gas nocivi, per cui ci si è orientati verso isolanti solidi ai quali sono richieste le caratteristiche seguenti:

- 1) possedere una condittività termica elevata
- 2) possedere una dilatazione debole per realizzare un'apparecchio completamente ermetico;
- 3) essere incombustibile.

Tali caratteristiche si trovano nella sabbia quarzosa che ha dilatazioni intorno all'1%, ed ha il potere di assorbire i fumi che si dovessero sviluppare in seguito ad incendio delle parti elettriche. Il problema termico viene risolto attuando il riempimento dell'involucro con sabbia quarzosa completata da un sistema di schermi metallici che assorbono il calore dovuto a fughe di corrente e lo trasmettono attraverso il quarzo alle pareti che portano una serie di alette di raffreddamento.

Il regolamento francese per questi tipi di trasformatori non richiede che siano corazzati ed a prova di esplosione perchè un piccolo spessore di quarzo è sufficiente ad impedire la propagazione della fiamma di grisou e non si determinano sovrappressioni interne. La temperatura delle parti attive di tale apparecchio supera al massimo di 15° - 20° quella delle pareti. La protezione è costituita da un termostato che agisce sul circuito di comando di un dispositivo di segnalazione o di una bobina di un interruttore automatico. Le potenze e le tensioni di queste apparecchiature vanno sino ad un massimo di 250 KVA e di 6600 Volt.

Dalla parte della bassa tensione il trasformatore ha collegato un interruttore automatico.

La sicurezza delle cabine di trasformazione viene così ad essere assicurata:

- a) contro i sovraccarichi dall'interruttore bassa tensione.
- b) contro i guasti all'interno del trasformatore vi sono dei fusibili che fanno intervenire l'interruttore a bassa tensione onde evitare il funzionamento in monofase:
- c) e per l'esclusione del trasformatore, l'interruttore della media tensione che ne consente l'esclusione sia a carico che a vuoto.

Tutte le apparecchiature sono in costruzione antigrisutosa corazz-

zata ed a secco onde evitare incendi.

Nella cabina a valle dell'interruttore automatico partono i cavi a bassa tensione che terminano sul quadro di distribuzione bassa tensione posto nelle vicinanze del taglio.

Detto quadro comprende: due compartimenti antideflagranti distinti.

Il compartimento superiore al quale arriva il cavo di alimentazione e parte il cavo diretto ai motori contiene:

- un sezionatore invertitore che deve essere capace di tagliare la corrente del motore bloccato e che è collegato con le porte di apertura del carter inferiore in modo che quando questo viene aperto non circoli corrente;
- le sbarre passanti che permettono per mezzo di un manicotto di collegamento l'alimentazione dello scompartimento vicino;
- l'amperometro e le luci di segnalazione.

Il carter inferiore ha invece un contatore a tutte le apparecchiature di protezione e di comando consistenti in fusibili di protezione e relais collegati con lo schermo di protezione dei cavi flessibili a bassa tensione.

Da questo quadro partono i cavi che vanno collegati con le macchine utilizzatrici.

I cavi a bassa tensione ed in particolare quelli che vanno dal quadro di distribuzione alle macchine sono generalmente cavi flessibili caratterizzati da una apparecchiatura di sorveglianza che taglia la corrente del cavo quando questo viene deteriorato. Un cavo flessibile è formato:

- dai 3 conduttori attivi;
- dai fili piloti che servono per effettuare i comandi a distanza e collegano le cassette di distribuzione con i motori;
- dal conduttore di terra la cui conduttanza non deve essere inferiore a quella del più grande conduttore attivo (non può usarsi nella bassa tensione la guaina in piombo quale via di terra come avviene nella M.T.);
- dalle guaine protettive;
- infine dalla guaina isolante del cavo stesso.

Tutti i conduttori attivi si trovano all'interno di una armatura formata da fili di rame posti sotto un involucro di gomma molto resistente. Questa copertura conduttrice è portata ad una tensione di 24 volt e fa parte del circuito di sorveglianza che è normalmente aperto.

Se un oggetto esterno conduttore penetra nel cavo, prima di incontrare i conduttori attivi, incontra questa guaina e chiude il circuito di sorveglianza, la cui corrente tramite relais fa scattare gli interruttori posti nella stazione di partenza aprendo il circuito.

Più recenti cavi sono costituiti dai fili attivi e dal filo di terra avvolti da una guaina di gomma conduttrice nella quale sono intercalati anche fili di rame per aumentare la conduttività.

L'apparecchiatura di sorveglianza funziona:

- 1°) quando la guaina di sorveglianza va a massa e quindi per corto circuito tra la guaina di sorveglianza e la terra;
- 2°) per corto circuito tra la guaina di sorveglianza e le fasi impedendo il corto circuito tra le varie fasi che sono separate dal mantello di sorveglianza.

Invece che una unica guaina protettiva i conduttori possono essere ciascuno avvolto da una guaina conduttrice individuale. Variano notevolmente i sistemi con i quali la chiusura del circuito di sorveglianza (la cui tensione è di 24 volt), determina la interruzione del circuito principale.

Non sempre tale protezione risulta efficace perchè per fare entrare in funzione il circuito di sorveglianza occorre un certo tempo per cui può avvenire che il corpo conduttore penetrando molto rapidamente nel cavo giunga a contatto con i conduttori attivi prima che sia stato interrotto il circuito.

In miniera i cavi di una rete devono essere calcolati:

- a) dal punto di vista del riscaldamento;
- b) dal punto di vista della tenuta della corrente di corto circuito;
- c) dal punto di vista della caduta di tensione.

Mentre le norme che regolano il calcolo dei punti a) e b) saran

no esaminate in seguito si ricorda qui brevemente la prassi da seguire per il calcolo del cavo dal punto di vista c).

Trascurando i casi nei quali particolari difficoltà di spunto richiedono l'esame esatto del problema, in genere il calcolo del cavo può essere approssimato trascurando la caduta di tensione nel motore e la caduta di tensione induttiva nel cavo e calcolando solo la caduta di tensione ohmica per una marcia normale del motore.

Detto $\cos \varphi$ il fattore di potenza della rete e I_n la intensità nominale del motore la caduta di tensione lungo il cavo che alimenta un motore caricato secondo i dati di targa è:

$$\Delta u = \sqrt{3} \cdot I_n \cdot r \cdot l \cdot \cos \varphi$$

essendo r la resistenza in ohms per fase e per chilometro del cavo ed l la sua lunghezza in chilometri.

In pratica basta generalmente limitare Δu ad un valore pari al 10% nei casi normali e pari al 5% nei casi ove si prevedono spunti difficili e trovare così il valore della sezione del cavo.

CAPITOLO II

Studio della Sicurezza contro il grisù

La scintilla elettrica in qualunque condizione prodotta accende sempre il miscuglio grisù-aria, se i tenori di questo sono compresi nei limiti di infiammabilità, per cui la possibilità di utilizzare le apparecchiature elettriche è legata alla possibilità di diluire il grisù molto al disotto dei limiti di infiammabilità. I regolamenti di Polizia Mineraria infatti prescrivono di togliere la corrente quando il tenore di tale gas superi l'1,0% in cantiere.

Ma potendosi verificare un aumento improvviso del tenore in grisù senza la possibilità di togliere la corrente tempestivamente, sono anche prescritte una serie di norme che regolano la costruzione delle apparecchiature elettriche da usare al fondo in modo da rendere estremamente improbabile che da queste possa innescarsi una esplosione di gas anche se questo raggiunge tenori pericolosi.

Queste apparecchiature dette di sicurezza saranno adesso esaminate in particolare:

In un primo tempo furono usate solo apparecchiature completamente annegate in olio in modo da evitare che fossero lambite dal grisù, similmente a quanto attuato nelle apparecchiature di sicurezza usate a giorno. Si dovettero però presto abbandonare sia per la facilità con cui si inquina l'olio nella atmosfera del sotterraneo, polverosa ed umida, sia perchè il trattamento rude al quale è sottoposto il materiale ne facilita le perdite, sia perchè l'olio costituisce un grave pericolo per le notevoli quantità di fumo che incendiandosi produrrebbe e che verrebbero immesse nei cantieri di coltivazione trasportatevi dalla corrente di ventilazione.

Si costruirono anche apparecchiature completamente stagne ma anche queste furono presto abbandonate per la particolare cura che richiedevano se si voleva garantire la ermeticità degli involucri e per le difficoltà che presentava il loro raffreddamento.

Fu scartata anche l'adozione di reticelle che racchiudessero le apparecchiature elettriche perchè troppo delicate e perchè l'accensione della miscela all'interno della protezione creava una depressione con conseguen-

te richiamo di altra miscela determinando il permanere della combustione sino a deteriorare il materiale elettrico.

Si giunge finalmente alle apparecchiature dette antideflagranti nelle quali il materiale elettrico è racchiuso in robuste carcasse atte a resistere alla eventuale esplosione interna del grisù, mentre l'apparecchiatura elettrica è in comunicazione con l'atmosfera ambiente attraverso fenditure strette ma profonde che raffreddando i gas caldi dell'eventuale esplosione interna, impediscono a questa di propagarsi nella atmosfera.

Il materiale per il principio stesso della sua costruzione risulta robusto, ma evidentemente costoso.

Pertanto, durante la guerra in Germania, per certe macchine il cui funzionamento in marcia normale non dà luogo a scintille, si usarono apparecchiature dette "di sicurezza interna" nelle quali la sicurezza è ottenuta oltre che con la limitazione dei luoghi di impiego con un miglioramento delle qualità elettriche del materiale rispetto a quelle normalmente usate in analoghe apparecchiature.

Nello stesso periodo furono attuate apparecchiature nelle quali la sicurezza è attuata con una corrente di ventilazione sotto pressione costituita da aria fresca o da gas inerte che lambendo il materiale elettrico ne impedisce il contatto con l'atmosfera ambiente.

In Inghilterra per garantire la sicurezza dei circuiti elettrici furono utilizzati ove possibile, circuiti di debole potenza detti di sicurezza elettrica.

Purtroppo ogni paese ha un suo regolamento, per cui le apparecchiature consentite da uno non lo sono dagli altri. Il regolamento italiano riportato nelle norme CEI prevede esclusivamente apparecchiature antideflagranti consentendo in particolari casi all'Ingegnere capo del distretto minerario di ammettere deroghe alle norme stesse.

Norme di costruzione delle apparecchiature di sicurezza.

Materiale antideflagrante

In questo materiale risulta estremamente improbabile che una eventuale esplosione interna possa propagarsi nell'atmosfera che lo circonda sia per le caratteristiche che presentano le fenditure della costruzione sia perchè nel carter a prova di esplosione difficilmente questa riesce a determinare fessure che potrebbero mettere l'apparecchiatura in comunicazione con l'esterno.

Per la sua costruzione è dunque necessario anzitutto conoscere i valori che può raggiungere la pressione all'interno in seguito alla esplosione della miscela detonante. Questo valore teorico massimo della pressione può essere calcolato conoscendo la reazione di combustione di una miscela nella quale i pesi dei componenti siano proporzionali ai valori stechiometrici (gru su 9%) e le condizioni iniziali di pressione e temperatura. Le condizioni pressioni evidentemente si ottengono supponendo che la reazione avvenga a volume costante, cioè in carter completamente chiuso. Il valore teorico di tale pressione è dell'ordine di 8,43 Kg/cm².

Il valore effettivo della pressione è però influenzato:

- 1) dalla forma del carter nel quale avviene la detonazione ;
- 2) dal volume del carter ;
- 3) dal punto ove si innesca l'esplosione;
- 4) dal modo in cui avviene l'innescio;
- 5) dalla possibilità di dissipazione del calore da parte delle pareti metalliche dell'involucro.

1°) La forma del carter ha una importanza fondamentale. Tra le forme geometriche semplici quella che consente il raggiungimento della pressione è la forma sferica nella quale l'innescio della esplosione avvenga al centro; infatti l'onda di propagazione della fiamma in questo caso raggiunge contemporaneamente superficie dell'involucro. Nelle forme che presentano spigoli, l'onda esplosiva viene a contatto prima con le facce dell'involucro con conseguente raffreddamento dei gas che influenzano la successiva combustione della miscela contenuta negli angoli.

Con involucri costituiti da diversi compartimenti, però, per effetto della decompressione dovuta a combustione parziale, per la agitazione del

miscuglio gassoso, ed in alcuni casi per effetto di fenomeni vibratorii, si possono raggiungere pressioni notevolmente più elevate (anche di 50 Kg/cmq). Questo avviene quando tra i diversi compartimenti la sezione di separazione è insufficiente a determinare una espansione di gas di entità tale da raffreddarlo evitando la trasmissione dell'accensione; si raggiungono invece nel caso che avvenga tale raffreddamento pressioni di solo $2 \div 3$ Kg/cmq (come nel motore asincrono per lo spazio tra statore e rotore).

2°) Il volume del carter ha una debole influenza sugli effetti della pressione.

3°) Come debole è l'influenza del luogo ove avviene l'esplosione. Quest'ultimo parametro più che influenzare il valore massimo della pressione ha notevole effetto sul gradiente di pressione che risulta massimo quando l'innesco avviene nel centro dell'involucro. Occorre, tener conto, allora, oltre che della sollecitazione statica di pressione anche dell'urto dinamico dovuto alla deflagrazione. Infatti dalle prove eseguite è risultato che l'aumento di pressione è pari a 0,291 Kg. per millesimo di secondo, gradiente che se non consente di considerare il fenomeno a carattere esplosivo è tuttavia sufficientemente rapido perchè si debbano considerare anche le sollecitazioni dinamiche.

Per la sicurezza degli interruttori in costruzione antideflagrante occorre tener conto anche della sorgente di accensione. Infatti è indubbio che la interruzione di un circuito elettrico di notevole potenza in aria ed una deflagrazione del grisù si influenzano vicendevolmente. Ad esempio se l'interruzione dovesse avvenire in aria ionizzata per effetto della deflagrazione non potrebbe raggiungere i risultati per i quali l'interruttore è costruito e potrebbe dar luogo a formazione di archi che scaldano, comprimono ed agitano la rimanente miscela esplosiva prima di accenderla, con conseguenze peggiori di una normale esplosione.

In conclusione agli effetti della dichiarazione di materiale antideflagrante nei riguardi della resistenza alla pressione degli involucri degli interruttori il valore di questa deve essere determinata sperimentalmente su un prototipo della apparecchiatura per la quale si chiede l'autorizzazione all'utilizzo in ambiente grisutoso. Determinata questa, si verifica se il carter re-

siste alla prova di pressione idraulica pari ad 1,5 volte la pressione misurata.

In Belgio la prova di pressione è effettuata con aria compressa. In Germania invece la prova può essere effettuata o con pressione statica oppure con la pressione dinamica di una esplosione reale. Naturalmente non tutte le apparecchiature possono essere provate nel secondo modo perchè la temperatura conseguente alla deflagrazione del grisù raggiungendo valori compresi fra i 200 - 270°C porta avaria al materiale elettrico contenuto nel carter; in tal caso la prova di esplosione si effettua su prototipi riservando alle apparecchiature che devono essere impiegate all'interno le prove di pressione statica.

Nelle altre apparecchiature elettriche usate in miniere le prove di esplosione hanno dato pressioni inferiori a 4 Kg/cm² ed i carter sono pertanto costruiti per resistere a pressioni dell'ordine di 6 kg/cm².

In Germania le pressioni di prova sono fissate in valori di 6 Kg/cm² per la capacità del carter compresa tra 2 e 100 cmc. e di 8 Kg/cm² per capacità superiori.

In America invece in tutti i carter che non abbiano dispositivi adeguati per consentire una espansione di gas si richiede che il materiale possa resistere con coefficienti di sicurezza adeguati a pressioni dello ordine di 7 kg/cm².

Il regolamento consente infatti che le apparecchiature abbiano valvole di pressione, dispositivi di scarico di olio e di acqua, orifici di ventilazione, purchè non lascino passare la fiamma e siano costruiti con materiale non soggetto a ruggine e possano essere controllati e puliti senza togliere loro l'efficacia.

Giunti stagni alla fiamma

L'altra caratteristica alla quale devono rispondere le apparecchiature elettriche di sicurezza contro il grisù è quella di arrestare la fiamma di una esplosione avvenuta entro il carter. Si è trovato che le fiamme si spengono se devono passare attraverso fessure strette e profonde, sia

per effetto del raffreddamento dei gas caldi al contatto con il metallo relativamente freddo delle pareti delle fessure stesse, sia perchè la laminazione imposta alla fiamma determina una turbolenza che richiama gas non bruciato che la raffredda portando la temperatura del miscuglio al disotto del punto di infiammazione del grisù. Questo ultimo fenomeno sarebbe preponderante per il raffreddamento della fiamma.

L'azione di una fenditura è comunque funzione anche della posizione della sorgente di infiammazione, risultando questa più pericolosa quanto più è vicina alla fenditura stessa.

La fenditura è caratterizzata dalla sua larghezza e dalla sua apertura. Sperimentalmente si è determinato che per ogni larghezza si ha un valore massimo dell'apertura sotto il quale la deflagrazione non viene trasmessa. Naturalmente questa delimitazione sperimentale non è netta, per cui il rapporto costruttivo deve tener conto di un certo margine di sicurezza. Si è sperimentalmente constatato che la apertura massima ammissibile è di 1,25 mm, oltre i quali la fiamma si propaga qualunque sia la larghezza del giunto.

In Francia si tiene conto anche del volume del carter per cui il regolamento prescrive i seguenti valori minimi della larghezza L:

L = 6 mm. per volume interno libero inferiore a 100 cmc.

L = 12,5 mm per volume interno libero superiore o uguale a 100 cmc.

Per quanto riguarda l'apertura i valori prescritti sono:

i \leq 0,3 mm se la lunghezza del giunto è inferiore a 12,5 mm

i \leq 0,4 mm se la lunghezza del giunto è compreso fra 12,5 e 25 mm.

i \leq 0,5 mm se la lunghezza del giunto è superiore a 25 mm.

Se però gli apparecchi sono in olio ed il loro funzionamento normale comporta la formazione di scintille, il regolamento francese prescrive una apertura massima di 0,15 mm qualunque sia la larghezza del giunto, perchè in seguito al cracking parziale dell'olio, determinato dagli archi che si formano nella macchina stessa, si può formare gas d'olio contenente sino ad 80% di idrogeno, gas più pericoloso dello stesso grisù.

Prescrizioni più dettagliate che interessano in particolare i costruttori sono riportate dai vari regolamenti di polizia mineraria.

E' comunque da tener ben presente che questi apparecchi non danno la sicurezza assoluta contro eventuali scoppi di grisù:

- sia perchè una cattiva manutenzione o scarichi a massa ripetuti possono alla fine diminuire la resistenza del carter sotto i limiti per i quali esso è stato costruito. Naturalmente a questo si ovvia con una manutenzione accurata del materiale, la cui utilizzazione deve essere fatta in funzione delle possibilità del materiale e soprattutto mantenendo con la ventilazione le percentuali di gas sotto i valori stabiliti dal regolamento;
- sia perchè le feritoie si sono dimostrate inefficaci nell'impedire la propagazione della esplosione quando si hanno proiezioni all'esterno di piccole particelle metalliche incandescenti (determinate dall'arco di corto circuito) che attraversata la fessura infiammano l'atmosfera esterna.

Le prove eseguite nelle stazioni hanno dimostrato la grande influenza delle dimensioni e della natura delle particelle: è più difficile la propagazione dell'esplosione con particelle di rame che con particelle di alluminio o di leghe leggere. Il carbone, proiettato fuori dal carter, pur aumentando lo effetto di luminosità, ha azione inibitrice e sottrae calore alle particelle metalliche diminuendo la temperatura.

Si ovvia a questo inconveniente costruendo le fessure a labirinto (pur essendo l'argomento ancora di dominio di laboratorio), che il regolamento tedesco prescrive per le apparecchiature di sicurezza.

Per dichiarare un'apparecchiatura di sicurezza, a questo riguardo, sono prescritte 30 prove di volatilizzazione di un filo di rame posto all'interno dell'apparecchiatura in prova, immersa in atmosfera grisutosa.

Apparecchi di sicurezza contro il grisù con protezione per mezzo di isolanti.

Queste apparecchiature hanno le parti, suscettibili di provocare l'accensione, racchiuse in un isolante, in modo tale che il miscuglio grisutoso che si trova all'esterno non possa essere acceso dagli archi, scintille o gas caldi che si producono all'interno dell'apparecchiatura isolata.

In Germania questa protezione è ammessa per tutte le apparecchiature anche per quelle che in funzionamento normale producono scintille; l'unico isolante ammesso è l'olio.

Il regolamento francese invece ammette l'uso di questa protezione solo per le apparecchiature che non producono normalmente scintille; d'altra parte ammette come isolanti anche isolanti solidi in grani di piccole dimensioni. Il miscuglio grisutoso pervenuto nell'interno dell'isolante brucia senza dar luogo a deflagrazione e senza propagare l'accensione all'esterno; pertanto non sono necessari i carter resistenti ad elevata pressione. E' necessario che queste apparecchiature consentano di controllare con facilità il livello dell'isolante.

Apparecchi di sicurezza elettrica.

Sono quegli apparecchi che in caso di avaria danno scintille di così debole potenza da non accendere la miscela. Sono comprese in questa categoria le installazioni telefoniche gli apparecchi di controllo, gli esploditori, i circuiti di controllo e di comando ed in genere tutte le apparecchiature di debole potenza.

Su un circuito elettrico a corrente continua di resistenza ohmica R e di induttanza L , vale per la differenza di potenziale tra gli elettrodi di rottura la legge di Ohm generalizzata per un circuito senza condensatori

$$V = E - Ri - L \frac{di}{dt}$$

e l'energia dissipata dalla scintilla è:

$$E = \int V i dt = \int (Ei - Ri^2) dt + \int - L i di$$

Il primo termine del secondo membro indica l'energia dissipata dalla sorgente, mentre il secondo termine $\frac{1}{2} Li^2$ rappresenta la energia magnetica immagazzinata dall'induttanza.

Quindi i circuiti a forte induttanza sono quelli che più difficilmente consentono la sicurezza elettrica.

Importanza fondamentale ha ovviamente il voltaggio di alimentazione:

tanto più è alto tanto maggiore è il pericolo che la scintilla si tramuti in arco.

Il diagramma allegato, trovato dal Cherchar, dà una serie di curve di intensità minima di infiammazione che legano la induttanza e la tensione del circuito.

Nei riguardi della accensione della miscela grisutosa fondamentale importanza ha il modo di rottura del circuito. Con circuiti ad induttanze elevate, le rotture rapide sono più pericolose di quelle lente essendo preponderante l'energia della "Self" rispetto a quella della sorgente. Con una "Self" debole una rottura lenta è più pericolosa di quella rapida essendo preponderante l'energia della sorgente, che viene dissipata in maggior quantità quando la rottura del circuito è lenta.

La possibilità di accensione è ancora funzione della forma degli elettrodi e del metallo di cui sono costituiti. La infiammazione è più facile con elettrodi a punta e con elettrodi costituiti da metalli che si volatilizzano facilmente.

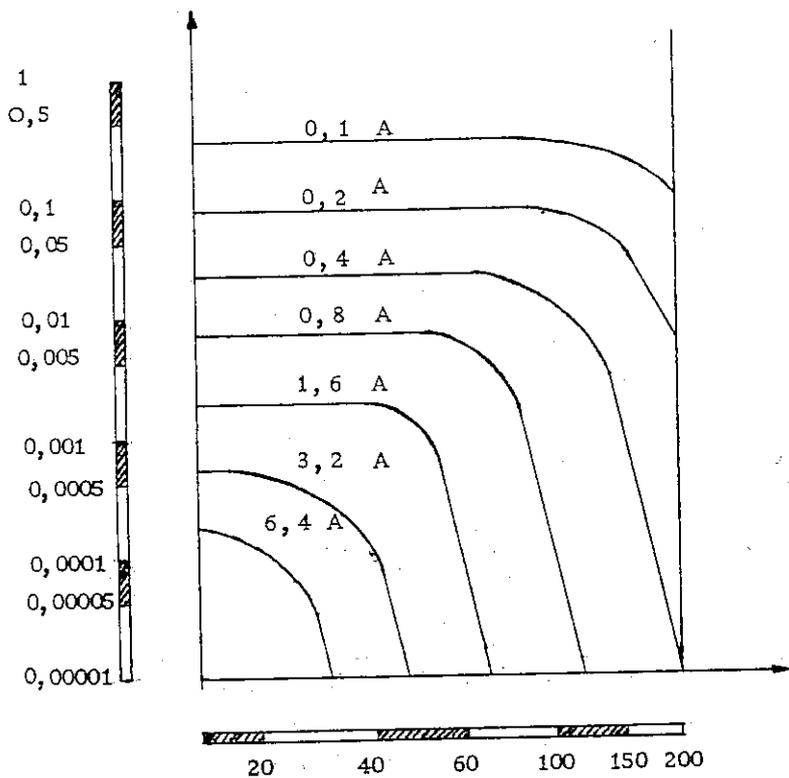


Fig. 7.

La rottura in corrente continua è più pericolosa di quella in corrente alternata, perchè in quest'ultimo caso, esiste la possibilità che la rottura avvenga in un intervallo di tempo nel quale l'intensità di corrente è nulla o de-

bole.

E' però difficile stabilire a priori se un circuito presenta sicurezza elettrica, non essendo possibile conoscere con precisione l'influenza dei numerosi parametri del circuito nei riguardi della possibilità di infiammazione.

La realizzazione pratica di un circuito di sicurezza elettrica si ottiene cercando di derivare in un circuito a debole corrente e debole voltaggio l'energia tenuta in riserva dalla induttanza in modo che questa non si scarichi nella scintilla che scocca tra gli elettrodi.

Si usano per questo come shunts di sicurezza dei raddrizzatori che presentano notevole resistenza allorchè la corrente passa in un senso, e debole resistenza se questa circola in senso contrario.

Lo schema si attua derivando un raddrizzatore in modo che presenti forte resistenza nel senso del passaggio normale della corrente e debole resistenza in senso opposto per assorbire la scarica induttiva.

Ancora maggiore sicurezza si ottiene utilizzando correnti elettroniche a debolissima intensità.

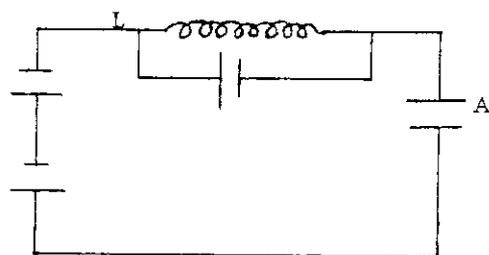


Fig. 8

Tipo di materiale di sicurezza denominato di sicurezza interna

Questo materiale è riconosciuto solo dal regolamento tedesco che lo definisce come quel materiale che non presenta in caso di funzionamento normale nessuna scintilla, mentre le possibilità di scintille dovute ad avarie sono notevolmente diminuite con l'uso di materiale elettrico le cui condizioni di utilizzazione si possono riassumere:

- 1) il materiale contenuto in carter che lo isola dall'acqua di sgocciolamento e dalla polvere grossolana (carter non a prova di esplosione);
- 2) sono usati isolanti di qualità superiore controllati ufficialmente;
- 3) la costruzione è particolarmente curata;
- 4) la temperatura è limitata intorno a 200° ed ai 165° per le parti che sono permanentemente sotto tensione;

5) la costruzione del materiale elettrico è tale che possa resistere in modo efficace agli effetti di corto circuito.

E' prescritto che il prototipo del materiale sia esposto in prova a correnti di corto circuito maggiori del 75% delle massime correnti che può portare senza danni in modo da determinarne il riscaldamento e la resistenza in corto circuito.

Il materiale non può essere usato per motori mobili semifissi o portatili.

Il vantaggio nell'usare questa apparecchiatura rispetto a quella antideflagrante è esclusivamente economico avendo il primo un costo inferiore del 30%.

Materiale protetto dalla ventilazione

Sono così definiti quei materiali nei quali le parti pericolose agli effetti dell'inflammazione del grisù sono contenute in carter ventilati sotto pressione o con aria fresca o con gas inerti. Il carter viene ventilato prima della messa in marcia in modo che il miscuglio esplosivo che fosse penetrato a contatto con le apparecchiature elettriche sia scacciato, mentre durante il funzionamento la leggera sovrappressione che regna all'interno del carter lo isola dalla atmosfera ambiente. In caso di arresto della ventilazione il circuito elettrico viene automaticamente interrotto. Tale sistema è soprattutto usato nei locomotori ad accumulatori.

Le norme italiane di polizia delle miniere e delle cave del 1959 precisano le condizioni di impiego del materiale elettrico nelle miniere in generale ed in quelle grisutose in particolare.

CAPITOLO III

La protezione delle reti di distribuzione di energia elettrica in minieraGeneralità

Uno dei più gravi e temuti pericoli connessi con la distribuzione di energia elettrica in miniera è certamente il pericolo di incendi, le sue conseguenze assumono infatti generalmente aspetti catastrofici, sia che l'incendio si estenda comunicandosi all'argomento con conseguente possibilità di frane, sia che i gas tossici da esso provocati, trasportati dalle correnti di ventilazione invadano i cantieri, sia infine che l'incendio inneschi l'infiammazione del grisù, se naturalmente questo gas è presente nell'atmosfera sotterranea in percentuali pericolose.

Considerando quindi che sebbene la possibilità di un incendio di origine elettrica in sotterraneo è un fatto raro, ma sfortunatamente non eccezionale, come dimostrano le statistiche relative, e considerando l'estrema gravità dei pericoli ad esso connessi, si capisce come rivesta la massima importanza lo studio accurato della protezione delle reti di distribuzione elettrica di miniera dal punto di vista possibilità di incendio.

I pericoli di incendio derivano anzitutto dagli effetti regolati dalla legge di Joule: in una normale rete sana, il passaggio della corrente elettrica provoca lo sviluppo di una certa quantità di calore, come è noto proporzionale al quadrato dell'intensità di corrente e la rete è concepita, costruita ed utilizzata in modo che tale calore, dovuto alle normali correnti, sia, in pratica, inoffensivo.

Se la rete è difettosa o sopporta dei sovraccarichi, le correnti di fuga, o i sovraccarichi, aumentano il valore delle correnti normali, e pertanto la quantità di calore prodotta può diventare proibitiva per la tenuta degli isolanti che, deteriorandosi, possono incendiarsi.

Allo scopo di impedire una tale temuta eventualità sono stati messi a punto particolari sistemi di protezione contro tali sovrintensità di corrente. La prima parte dell'esposizione è dedicata appunto allo studio della protezione contro queste sovrintensità.

Oltre al caso normale di una rete sana , o più o meno difettosa, percorsa da un sovraccarico, esiste il caso normale di una rete che funziona su un corto-circuito più o meno franco, in cui tutta l'energia immagazzinata dalla rete tende ad incanalarsi attraverso il corto-circuito, da cui le elevatissima intensità, dette appunto di corto-circuito, che provocano evidentemente dei riscaldamenti pericolosissimi; in tal caso inoltre i fenomeni termici sono combinati a degli sforzi elettrodinamici che possono provocare la rottura dell'apparecchiatura.

In una seconda parte ci occuperemo perciò dello studio della protezione contro i pericoli di corto circuito, ed esamineremo inoltre rapidamente le diverse misure da adottare al fine di limitare i pericoli di incendio di origine elettrica in sotterraneo.

Scelta corretta del cavo dal punto di vista termico.

Il 70% degli incendi determinati in sotterraneo da apparecchiature elettriche sono imputabili ai cavi, e fra questi soprattutto ai cavi armati o rivestiti.

Per impedire il riscaldamento pericoloso del cavo occorre dimensionarlo in modo tale che la corrente non determini un innalzamento della temperatura oltre il punto di infiammazione del materiale isolante che avvolge il conduttore, o meglio oltre il punto di "éclair", cioè oltre quella temperatura sopra la quale l'isolante emette vapori infiammabili.

Il punto di "éclair" del materiale usato per i cavi oscilla tra i 125°C ed i 320° C, mentre il punto di infiammazione, cioè la temperatura alla quale il materiale brucia per 5 secondi senza interruzione, varia da 135° C a 358° C.

Generalmente nessuna norma di Polizia Mineraria limita il valore massimo della temperatura alla quale possono essere portati i cavi. I costruttori consigliano però di non superare temperature di 50° C nei conduttori; cioè ammettendo una temperatura ambiente di 20° C, la quantità di calore emessa per effetto Joule deve essere tale da non far aumentare la temperatura interna del cavo di oltre 30° C sopra quella ambiente.

Il carico massimo in ampère che un conduttore può portare in modo da non superare la temperatura di 50° C, con temperatura media ambiente di 20° C, è riportato nella seguente tabella:

Sezione dei conduttori mmq.	Cavi isolati con carta impregnata		Cavi isolati in gomma (armati o flessibili)	
	Intensità max. (A)	Densità max. (A/S)	Intensità max. (A)	Densità max. (A/S)
10	55	5,5	55	5,5
16	74	4,6	74	4,6
25	102	4,1	102	4,1
35	137	3,9	135	3,8
50	153	3,1	147	2,9
70	183	2,6	170	2,4
95	212	2,2	195	2,05

Si noti che la densità massima ammessa diminuisce fortemente all'aumentare della sezione dei conduttori, perchè nei cavi di minor sezione il rapporto tra la massa che disperde il calore e quella dei conduttori è più elevata che in quelli di grossa sezione.

In Germania l'ufficio delle miniere ammette temperature massime nei conduttori di 65° C.

Naturalmente per la determinazione dell'intensità di corrente ammessa occorre tener conto della corrente efficace, o meglio dei valori massimi che essa raggiunge negli spunti.

Se però la macchina o le macchine servite dalle rete sono a funzionamento intermittente, è necessario tener conto dei periodi di riposo, durante i quali il cavo si raffredda. Il regolamento tedesco ammette delle riduzioni di sezione corrispondenti alla media quadratica delle correnti se la durata totale di marcia non supera i 4 minuti ogni ora.

Protezione contro i sovraccarichi

Per determinare le apparecchiature di protezione contro i sovraccarichi è necessario tener conto del tempo durante il quale un cavo può sopportare un certo "sovraccarico" di valore determinato senza superare la temperatura di 50°C dianzi definita. Infatti, ammesso un certo carico di lavoro, che determina nel conduttore una temperatura inferiore ai 50°C , potranno essere consentiti dei sovraccarichi purchè limitati nel tempo.

E' dunque necessario adottare delle protezioni il cui tempo di interruzione del circuito deve essere inferiore al tempo necessario al sovraccarico per portare la temperatura del cavo oltre i 50°C .

Posti in ascisse i tempi, in ordinate le temperature ϑ , la curva sperimentale di riscaldamento di un cavo percorso da una certa corrente può essere assimilata ad un'iperbole, i cui asintoti sono la retta ϑ_m corrispondente ad una temperatura per la quale è raggiunto l'equilibrio tra il calore prodotto e quello disperso e la retta $t = T$, che prende il nome di costante di tempo del cavo e che dipende dalle condizioni di raffreddamento e dalle caratteristiche costruttive del cavo stesso.

L'equazione di quest'iperbole (figura 9), riferita agli asintoti, si scrive pertanto:

$$(\vartheta_m - \vartheta)(T + t) = \vartheta_m T$$

da cui si ricava: $\vartheta = \frac{\vartheta_m T}{T + t}$; $t = \frac{\vartheta T}{\vartheta_m - \vartheta}$

Se $t = T$, risulta $\vartheta = \frac{\vartheta_m}{2}$ da cui deriva il significato fisico di T , che non è altro che il tempo necessario perchè la temperatura raggiunga la metà del suo valore massimo sotto quel carico, sperimentalmente si sa che T ha un valore medio di circa mezz'ora.

Chiamiamo I_0 il valore del carico cui è sottoposto il cavo, con I_s il sovraccarico che succede al carico I_0 , e con I_p l'intensità della corrente di pieno carico. ϑ_0 , ϑ_s e ϑ_p siano rispettivamente le temperature alle quali il cavo si riscalda per effetto di queste correnti, e ϑ_m la temperatura massima ammessa sotto un sovraccarico.

Se il cavo fosse sottoposto al carico I_s partendo dalla temperatura

ra ambiente, la curva di riscaldamento sarebbe l'iperbole $OAB \cdot \vartheta_s$ (figura 10); ed i valori ϑ e t sarebbero rispettivamente:

$$\vartheta = \frac{\vartheta_s t}{T + t} \quad ; \quad t = \frac{\vartheta \cdot T}{\vartheta_s - \vartheta}$$

In realtà il cavo parte dalla temperatura ambiente sotto il carico I_o , e l'aumento della temperatura ϑ con il tempo t segue nel primo tratto l'iperbole OA' ; se nel punto A' si applica al cavo il sovraccarico I_s , la curva di riscaldamento continuerà con la iperbole $A'B' \cdot \vartheta_s$, parallela alla curva $OAB \cdot \vartheta_s$. Avendo stabilito che il riscaldamento del cavo non debba superare ϑ_m , avremo che il tempo durante il quale può verificarsi il sovraccarico I_s sarà t_s il cui valore è dato da:

$$t_s = t_m - t_o$$

Sostituendo ai valori t_m e t_o quelli ricavati dall'equazione della iperbole, cioè:

$$t_m = \frac{\vartheta_m T}{\vartheta_s - \vartheta_m} \quad ; \quad t_o = \frac{\vartheta_o T}{\vartheta_s - \vartheta_o}$$

$$\text{si ottiene: } t_s = t_m - t_o = T \cdot \vartheta_s \cdot \frac{(\vartheta_m - \vartheta_o)}{(\vartheta_s - \vartheta_m)(\vartheta_s - \vartheta_o)}$$

Vogliamo ora esprimere il tempo t_s , anzichè in funzione delle temperature, in funzione delle intensità di corrente.

Poniamo $a = I_s/I_p$, essendo a la percentuale della corrente di sovraccarico rispetto al pieno carico ammesso, e $p_o = I_o/I_p$, essendo p_o la percentuale della corrente iniziale in rapporto al pieno carico ammesso (il pieno carico è inferiore al carico massimo ammesso in sovraccarico).

Tenendo conto della legge di Joule, possiamo scrivere, trascurando le perdite (dielettriche):

$$\frac{\vartheta_s}{\vartheta_p} = \frac{I_s^2}{I_p^2} = a^2 \quad ; \quad \frac{\vartheta_o}{\vartheta_p} = \frac{I_o^2}{I_p^2} = p_o^2$$

Se chiamiamo con K il rapporto tra la temperatura massima ϑ_m autorizzata in sovraccarico rispetto alla temperatura ϑ_p di pieno carico, cioè $K = \vartheta_m / \vartheta_p$, otteniamo, dividendo numeratore e denominatore della espressione di t_s per ϑ_p :

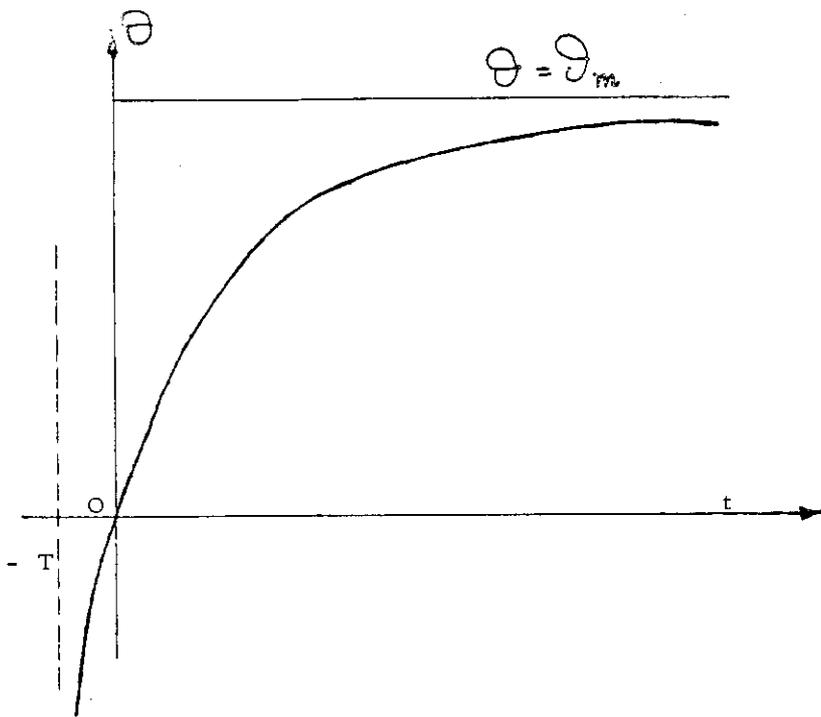


Fig. 9

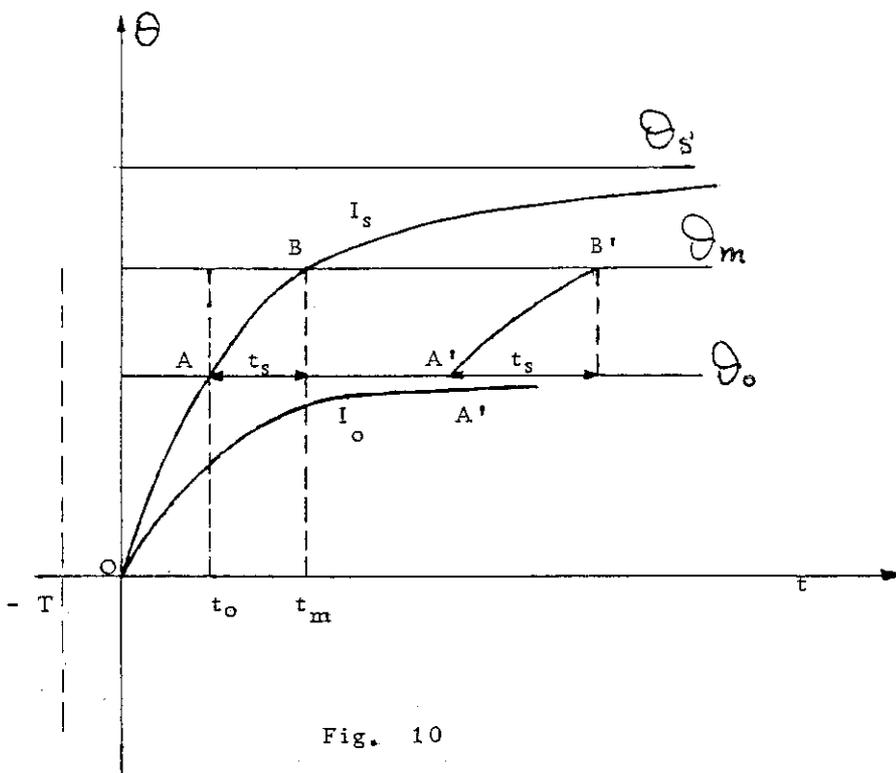


Fig. 10

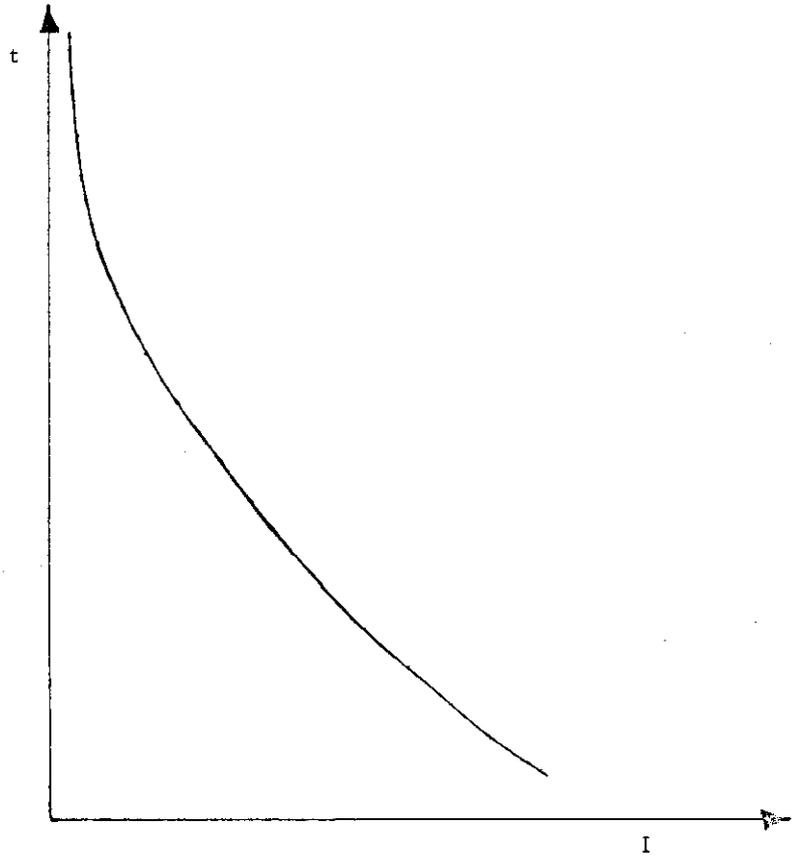


Fig. 11

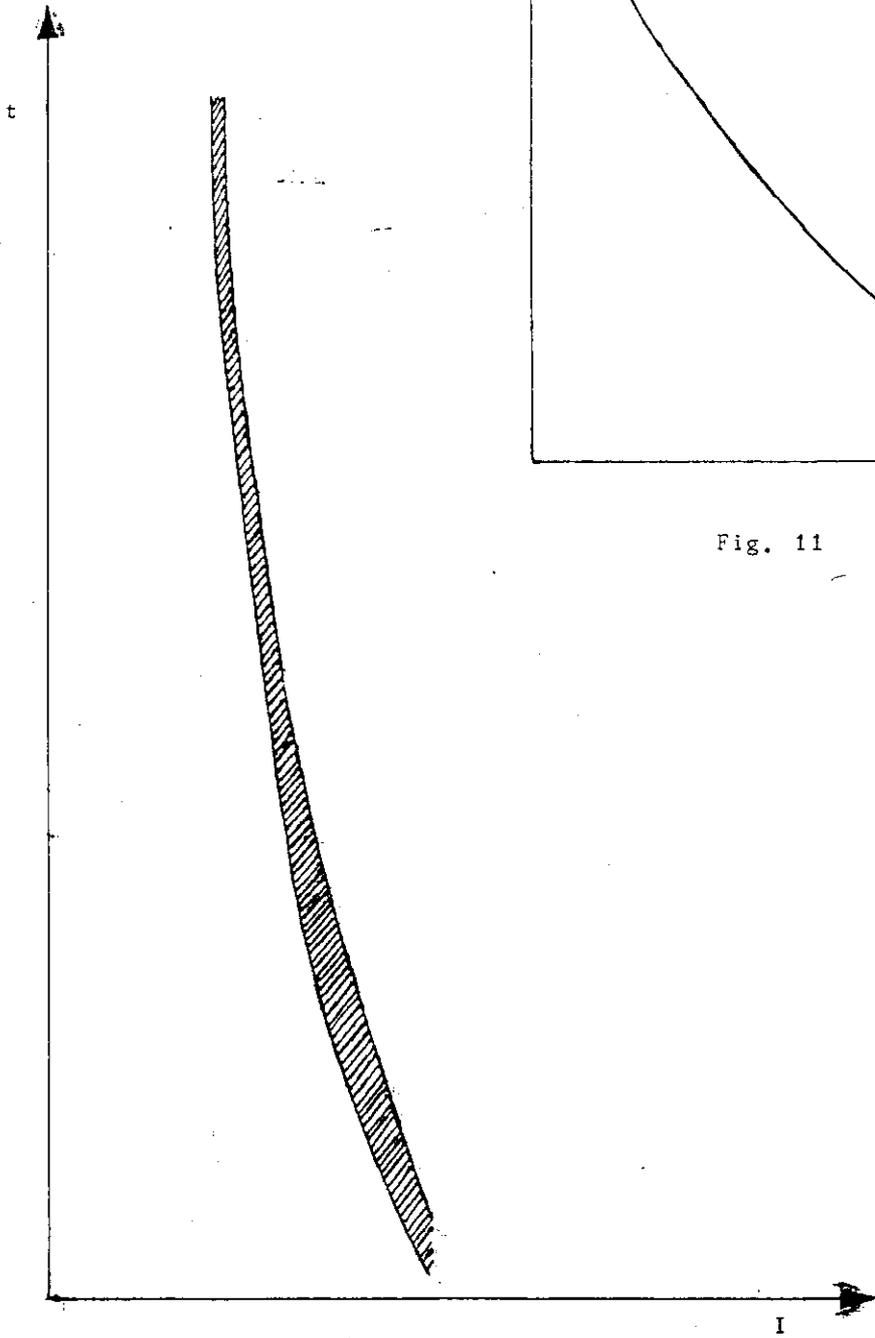


Fig. 12

$$t_s = \frac{\left(\frac{I_m}{I_p} - \frac{I_0}{I_p}\right) T I_s}{\left(\frac{I_s}{I_p} - \frac{I_m}{I_p}\right) (I_s - I_0)} = \frac{(K-p_0^2) T I_s}{(a^2-K) (I_s - I_0)}$$

sostituendo al posto di I_s il prodotto $a^2 I_p$:

$$\frac{(K-p_0^2) T a^2 I_p}{(a^2-K) (I_s - I_0)}$$

e dividendo numeratore e denominatore per I_p , si ha infine:

$$t_s = \frac{(K-p_0^2) \cdot T \cdot a^2}{(a^2-K) (a^2 - p_0^2)}$$

Tale formula permette di conoscere la durata del tempo t_s durante il quale possono essere ammessi sovraccarichi di valore determinato, conoscendo lo stato iniziale del carico e le correnti di sovraccarico e di pieno carico.

Conosciuto questo tempo, possono, evidentemente, scegliersi i limiti di funzionamento delle protezioni contro i sovraccarichi. Conoscendo la curva di taratura del relè e dei fusibili date dalle case costruttrici può dunque attuarsi la scelta ottima.

La forma delle curve di taratura anzidetta è riportata in figure 11 e 12, per relè e fusibili, rispettivamente. Per i fusibili in particolare, non si ha una vera e propria curva di funzionamento, piuttosto una zona di funzionamento, il cui valore dipende in modo sensibilissimo dalla qualità del fusibile.

Per sovraccarichi deboli la protezione più stretta si ha con i relè, essendo la curva più verticale che per i fusibili, condizione che si inverte per i sovraccarichi maggiori.

In linea generale si può dire che il tempo di funzionamento di una apparecchiatura di protezione è molto più piccolo del tempo necessario ad un sovraccarico per far salire la temperatura oltre il valore critico. La sicurezza fornita dai relè è notevole, anche perchè la temperatura limite dei cavi è notevolmente al disotto della temperatura di infiammazione dei materiali che li costituiscono.

Questi dispositivi di sicurezza devono essere montati in tutti i

punti ove varia la sezione dei conduttori, se naturalmente altre apparecchiature a monte non garantiscono la interruzione del circuito. Essi devono essere montati all'inizio dei cavi che devono proteggere. Se molte canalizzazioni sono montate in parallelo, i dispositivi devono essere montati all'arrivo e alla partenza di ogni ramo. Non vi è bisogno di tali interruttori per lunghezze inferiori ai 5 metri, o 10 se trattasi di una installazione per illuminazione.

Pericoli di incendio dovuti alle fughe

Le fughe possono determinare incendi sia perchè le correnti di fuga si sommano alle correnti normali (in tal caso agisce la protezione contro i sovraccarichi), sia perchè queste correnti si possono chiudere attraverso la terra. Se il conduttore di terra offre una bassa resistenza ed è sufficientemente ben connesso per captare la fuga, e l'isolamento del circuito è buono, i pericoli sono, di massima, eliminati.

Il regolamento francese prescrive che i conduttori di terra debbano avere una conduttanza, per unità di lunghezza, almeno uguale a quella del più grosso conduttore attivo di alimentazione, senza che perciò sia necessario superare la conduttanza di un cavo di rame di 50 mmq di sezione.

Nelle reti di elettrificazione in sotterraneo si adottano come conduttori di terra o la guaina di piombo del cavo, limitatamente alla media tensione, o un conduttore interno al cavo, o un conduttore di terra esterno al cavo.

La prima soluzione presenta delle difficoltà nel superamento delle scatoie di giunzione ed inconvenienti nel caso che il piombo si rompa (caso dei cavi a bassa tensione che vengono molto spesso rimossi) e venga a cessare la continuità elettrica.

La seconda soluzione, oltre ad essere più costosa, presenta difficoltà per la ispezione del conduttore a terra. La terza soluzione è la più diffusa: consente di verificare agevolmente il filo a terra esponendolo però al pericolo di rottura.

Protezione contro i corto circuiti

Allorchè avviene il corto circuito, tutta la rete di distribuzione, a monte del punto in cui è avvenuta la chiusura stessa del circuito, viene percorsa da una corrente di notevole intensità, che può determinare una quantità di calore tale da portare la temperatura dei cavi ed in genere tutte le apparecchiature elettriche, oltre i limiti di infiammabilità, oltre a determinare sollecitazioni meccaniche.

La protezione contro i corto circuiti, in una rete di distribuzione in sotterraneo, consiste:

- a) nel costruire la rete in modo tale che possa sopportare le sollecitazioni termiche e dinamiche determinate dalle correnti di corto circuito;
- b) nell'installare, in punti idonei della rete, le apparecchiature di interruzione automatica, che eliminano le correnti di corto circuito prima che queste abbiano potuto danneggiarla;
- c) nel calcolare i cavi in modo tale che la corrente di corto circuito minimo che si verifica in miniera sia sufficientemente elevata per consentire il funzionamento degli interruttori di massima, in un tempo sufficientemente corto.

Riferendoci al punto a), il tempo durante il quale la corrente di corto circuito percorre la rete è funzione dell'inerzia dell'apparecchiatura di protezione che essa comporta. Durante questo tempo, il cui valore massimo ammesso in Francia è di 2 secondi, i cavi devono resistere alla corrente di corto circuito senza essere danneggiati. Anche le altre apparecchiature della rete sono in questo periodo sollecitate in modo anormale; la loro scelta idonea a resistere a tali correnti è compito del costruttore, una volta che questo sia a conoscenza della intensità massima di corto circuito. Il valore di questa intensità dipende invece in buona misura dalla rete dei cavi, la cui scelta spetta al tecnico della miniera.

Vediamo pertanto come viene calcolata la sezione dei cavi in funzione della intensità di corto circuito, cioè quale densità di corrente di corto circuito questi possono sopportare in modo da limitare gli effetti termici.

Il tempo durante il quale la corrente di corto circuito percorre

il cavo è così breve che, contrariamente a quanto abbiamo supposto nel caso dei sovraccarichi, il cavo lo dobbiamo supporre isolato termicamente.

Detta I la corrente di corto circuito, S la sezione del conduttore, ρ la resistività a zero gradi C, δ la densità del materiale che costituisce il conduttore, c il suo calore specifico in Cal per kg e grado C, $d\vartheta$ l'aumento di temperatura nel tempo dt , per una lunghezza unitaria del cavo deve essere verificata la relazione:

$$\frac{\rho}{S} (1 + \alpha \vartheta) I^2 dt = 4170 \cdot S \cdot \delta \cdot c \cdot d\vartheta.$$

ricordando che una caloria al secondo è uguale a 4170 Watt.

$\rho (1 + \alpha \vartheta)$ è la legge di variazione della resistività ρ con la temperatura, essendo α una costante dipendente dalla natura del materiale che costituisce il cavo.

Dall'espressione su scritta, separando le variabili, si ottiene:

$$\frac{d\vartheta}{1 + \alpha \vartheta} = \frac{\rho}{S^2} I^2 \frac{dt}{c \cdot \delta \cdot 4170}$$

Chiamando $\Delta = I/S$ densità di corrente e $K = \frac{\rho}{4170 \cdot c \cdot \delta}$ la relazione diventa:

$$\frac{d\vartheta}{1 + \alpha \vartheta} = \Delta^2 K dt$$

integrando: $\frac{1}{\alpha} \log (1 + \alpha \cdot \vartheta) = K \Delta^2 t$

e passando ai numeri: $1 + \alpha \vartheta = e^{K \cdot \alpha \Delta^2 \cdot t}$

Infine ricavando: $\vartheta = (e^{\alpha K \Delta^2 t} - 1) \frac{1}{\alpha}$

Il valore di K , funzione del conduttore usato, vale per il rame $K = 0,19 \cdot 10^{-4}$, per l'alluminio $K = 0,425 \cdot 10^{-4}$.

In Francia si consente che durante i due secondi ammessi come massimo di durata del corto circuito, la temperatura non superi i 100° C.

Pertanto, sostituendo tali valori a ϑ ed a t , si ottiene che, per i conduttori di rame, la densità massima di corrente deve essere di 70 A/mm².

Per un tempo di $0,1$ secondi la densità ammessa sale a valori di 300 A/mm². La regola pratica approssimata che limita il valore di Δ , a 90 A/mm², dipende precisamente da questi calcoli, tenuto conto della i-

nerzia media degli interruttori di massima.

In Germania invece si ammettono elevazioni di temperatura, per cavi di tensione inferiore a 6000 volts, sino a 160° C e si ammette che il corto circuito possa durare 5 secondi.

Per la durata di un corto circuito di intensità I, viene consigliata la seguente espressione:

$$t = \frac{D \cdot S^2 \cdot K'}{I^2}$$

che è semplificata rispetto alla precedente, non tenendo conto delle variazioni di resistività con la temperatura, o meglio conglobandole nel valore della costante K'.

Nella formula, dando a D il valore di 160° C ed a t il valore di 5 secondi (la costante k' per il rame assume il valore di 180) si può ricavare la sezione del cavo per una determinata intensità di corto circuito I.

Con i precedenti valori, la densità di corrente ammessa, per la durata di corto circuito di 1 secondo, è di 140 A/mmq. In Francia invece le più onerose limitazioni portano queste densità, per lo stesso tempo (1 secondo); a valori di 95 A/mmq.

Con riferimento al punto b), circa i criteri per la protezione contro i corto circuiti, una volta stabilita la sezione del conduttore, in modo che questo non sia danneggiato da un eventuale corto circuito, la cui durata non deve superare i valori sopra citati, si dovranno scegliere gli interruttori di massima in modo che il loro potere di sezionamento sia superiore alla corrente di corto circuito da interrompere.

Da quanto detto precedentemente si capisce come il calcolo della intensità massima di corrente di corto circuito rivesta la massima importanza; vediamo dunque come si effettua questo calcolo.

Calcolare la corrente di corto circuito in un punto dato di una rete consiste nell'applicare la legge di Ohm ad uno schema elettrico elementare che possiede una impedenza equivalente a quella di tutti gli elementi posti in serie e in derivazione a monte del corto circuito.

$$J = 1,1 \frac{U}{\sqrt{3 \cdot Z}} \quad \text{ove } Z = \sqrt{(\sum x)^2 + (\sum r)^2}$$

Per il calcolo della impedenza equivalente, conviene:

- calcolare le reattanze per fase;
- rapportare tutte le reattanze alla stessa tensione, preferibilmente alla tensione nominale del punto del corto circuito, ricordando che le reattanze sono proporzionali al quadrato della tensione, ossia se $X_1; R_1; Z_1$ sono rispettivamente la reattanza, la resistenza ohmica e l'impedenza alla tensione U_1 , gli stessi valori alla tensione U_2 sono dati da:

$$R_2 = R_1 \left(\frac{U_2}{U_1}\right)^2 \quad ; \quad X_2 = X_1 \left(\frac{U_2}{U_1}\right)^2 \quad ; \quad Z_2 = Z_1 \left(\frac{U_2}{U_1}\right)^2$$

Ricordiamo che il calcolo dei diversi elementi di una rete si effettua come segue:

- Impedenza di una generatrice:
$$Z_g = \frac{U_n^2 \cdot 10 \cdot a}{N_n}$$

dove U_n (in KV), N_n (in KVA) ed a , sono rispettivamente la tensione, la potenza nominale della generatrice, e la tensione di corto circuito della stessa (variabile in genere dal 7 al 20%).

- Impedenza di un trasformatore - La resistenza ohmica può essere trascurata

$$Z_t = \frac{10 \cdot U_n^2 \cdot b}{N_n}$$

dove U_n (in KV) ed N_n (in KVA) sono rispettivamente tensione e potenza nominali del trasformatore e b è la tensione di corto circuito dello stesso, variabile in genere fra 2 e 8%.

- Impedenza di una bobina di reattanza - Anche per una bobina di reattanza la resistenza ohmica è trascurabile

$$Z_b = \frac{10 \cdot U_n^2 \cdot c}{N_n}$$

dove U_n (in KV) ed N_n (in KVA) sono rispettivamente tensione e potenza nominali della bobina e c è la caduta di tensione percentuale data dalla bobina stessa (variabile in genere dal 3 al 10%).

- Impedenza di una linea - La reattanza di una linea è trascurabile rispetto alla resistenza ohmica, perciò:

$$r = \frac{1000 \cdot L}{\gamma \cdot S} \quad \text{ohm/fase}$$

in cui L è la lunghezza del conduttore in km, S la sezione del cavo in mmq e γ la conduttività del conduttore (uguale a 57 per rame, uguale a 35 per alluminio).

Bisogna quindi tenere conto che la resistenza o la reattanza equivalente ad un certo numero di resistenze o reattanze in serie è la somma algebrica delle resistenze o reattanze considerate; mentre per il montaggio in parallelo sono valide le formule

$$r = \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2} ; \quad x = \frac{x_1 x_2}{x_1 + x_2}$$

$$r = \frac{r_1 \cdot r_2 \cdot r_3}{r_1 r_2 + r_1 r_3 + r_2 r_3} ; \quad x = \frac{x_1 x_2 x_3}{x_1 x_2 + x_1 x_3 + x_2 x_3}$$

Una limitazione della corrente di corto circuito porta evidentemente alla utilizzazione di interruttori di massima di minor potenza, e quindi ad un risparmio nell'investimento; tanto più che occorre imputare al costo di installazione di queste apparecchiature lo scavo degli alloggiamenti relativi, tanto più grandi quanto più lo sono le apparecchiature stesse.

Notevole effetto hanno, nella limitazione di un corto circuito, i cavi a bassa tensione, con la loro elevata resistenza ohmica.

a) Nelle linee a media tensione si usano delle bobine di reattanza, che sono costituite da conduttori di grande sezione avvolti in spirali molto larghe e che danno una caduta di tensione molto ridotta, tali bobine di reattanza diminuiscono l'intensità di un corto circuito del valore:

$$J_m = 100 \frac{I_n}{c}$$

essendo c la caduta di tensione in %, quando la bobina sotto la tensione U_n lascia passare la corrente I_n ($c = 3 - 10\%$).

b) Possono utilizzarsi dei trasformatori a tensione di corto circuito elevata; abbiamo visto infatti che l'intensità di corrente J_m , e quindi la potenza di corto circuito disponibile ai morsetti della bassa tensione è inversamente proporzionale alla tensione di corto circuito. Questa soluzione non dà però ren

dimenti elevati di trasformazione.

c) Possono impiegarsi trasformatori con rapporto di trasformazione 1/1, che hanno il vantaggio di limitare il corto circuito ad un massimo determinato dal trasformatore e di separare elettricamente la distribuzione del sotterraneo da quella a giorno. La soluzione è costosa.

d) Possono ancora impiegarsi, sempre per limitare la corrente di corto circuito, fusibili ad alto potere di interruzione, che varia da 250 a 450 MVA, più che sufficienti per le potenze di corto circuito che si possono avere in una rete di distribuzione. Questo porta però alla discontinuità dello esercizio, dovuta ai fusibili.

Sin'ora abbiamo visto quali sono le precauzioni contro i corto circuiti, di cui abbiamo imparato a calcolare la corrente per la determinazione degli interruttori di massima che devono essere installati. Abbiamo visto ancora che per limitare il costo di installazione si adottano apparecchiature che limitano la potenza di corto circuito. Ci si è occupati praticamente dei corto circuiti che danno una intensità di corrente massima.

Sussiste però la possibilità che il corto circuito sia bipolare, tale da determinare una corrente di corto circuito così bassa da non far scattare gli interruttori di massima installati. Il valore teorico di frenatura della corrente di corto circuito, effettuata dalla resistenza dei cavi, può essere tale da far diminuire la corrente di corto circuito nel punto ove è situata la apparecchiatura di interruzione, talchè questa non agisce in un tempo sufficientemente rapido ad evitare la distruzione delle apparecchiature.

La corrente di corto circuito minima (bipolare) a bassa tensione ha un valore pari a

$$J_b = 0,86 J$$

ma per maggior garanzia e per tener conto dell'impedenza dell'arco, si valuta:

$$J_b = 0,635 J$$

Il regolamento tedesco pertanto, che prescrive che si deve assicurare una durata del corto circuito inferiore ai 5 secondi, dice che l'intensità del corto circuito deve essere almeno 10 volte l'intensità nominale del fusibile di protezione. Tenendo conto del potere frenante di un cavo, que

sta imposizione limita la distanza di protezione che può avere un determinato fusibile.

Lotta contro un incendio di origine elettrica al fondo

Benchè la lotta contro un incendio di origine elettrica rientri nel caso più generale della lotta contro un incendio di ordine generale al fondo, devono essere osservate delle regole particolari, fra le quali possiamo citare anzitutto la necessità di tagliare, nel più breve tempo possibile, la corrente elettrica nel settore interessato dall'incendio (se questo taglio non è già stato effettuato automaticamente). Non soltanto in tal modo si sopprime la causa dell'incendio, ma si evita ancora che un corto circuito più importante metta fuori uso la rete di tutto un quartiere o di tutta la miniera; infine si evita l'elettrocuzione che può derivare dal fatto che la corrente può essere condotta attraverso i fluidi di estinzione (per esempio acqua), che possono essere conduttori.

L'estintore dielettrico più usato in miniera è la sabbia secca, riserve della quale devono essere tenute a disposizione nei punti in cui può svilupparsi un incendio di origine elettrica: ad esempio in corrispondenza di una sottostazione di trasformazione.

Gli estintori a tetracloruro di carbonio o a bromuro di metile sono dielettrici, ma presentano il grave inconveniente di sviluppare vapori sottili, perciò possono essere usati soltanto in casi particolari, ossia quando l'incendio si sviluppa in punti in cui non esiste il pericolo che la corrente di ventilazione che trasporta i gas tossici passi nei cantieri di coltivazione: ad esempio al riflusso.

Gli estintori ad anidride carbonica sono efficaci solo in spazi ristretti e non danno risultati soddisfacenti ove la corrente di ventilazione è forte, perchè il gas si diluisce rapidamente.

Altri estintori usati sono a polvere secca, che viene proiettata dalla detonazione di una piccola carica esplosiva. Di costruzione robusta, sono generalmente in dotazione alle tagliatrici e caricatrici.

Gli estintori a schiuma, che non sono dielettrici, possono essere usati solo se la corrente non è stata interrotta.

Per determinare il luogo ove questi estintori devono essere alloggiati, ci si riferisce generalmente alle norme prefissate dal regolamento inglese che prescrive:

- 1) in tutte le miniere si deve tener pronto, in ogni cantiere di abbattimento e nelle vie principali, una sufficiente riserva di sabbia o di polvere idonea ad essere usata come estintore, oltre ad un certo numero di estintori portatili. A questa regola si può derogare se si assicura negli stessi punti una idonea alimentazione di acqua ed una attrezzatura necessaria per adoperarla nella lotta contro l'incendio;
- 2) in tutti i punti ove si è immagazzinata la sabbia, o la polvere, o l'acqua, vi deve essere l'apparecchiatura necessaria per spostare a mano questo materiale nel punto ove è scoppiato l'incendio;
- 3) ogni volta che una tagliatrice lavora in taglio ove si siano avuti scoppi di grisù, o dove si presuma che questi possano avvenire, la tagliatrice deve essere antigrisutosa e deve essere corredata da un recipiente di sabbia o da un estintore portatile. Se questo non fosse possibile, per la piccola potenza dello strato, devono essere disposti detti materiali ad intervalli regolari lungo il taglio e nelle vie di servizio del taglio stesso;
- 4) gli estintori debbono essere sovente controllati, in modo da assicurare il loro funzionamento;
- 5) è proibito usare estinteri che producono gas nocivi. Tutte le miniere che occupano al fondo più di 100 uomini devono essere fornite:
 - a) di una riserva d'acqua sufficiente per combattere gli incendi;
 - b) di mezzi idonei per trasportare quest'acqua e versarla in quantità e pressione sufficiente in tutte le parti della miniera ove possono avvenire incendi;
 - c) se l'acqua è contenuta in serbatoio, questo dovrà poter essere svuotato con pompa comandata a mano;
 - d) una volta al mese, il materiale dovrà essere esaminato da persona competente che deve riferire per iscritto alla direzione della miniera;
 - e) la direzione provvederà a costituire una squadra antiincendi e la terrà allenata; della squadra devono far parte anche degli elettricisti, istruiti in modo da poter fornire le prime cure in caso di elettrocuzione.

APPENDICE

Parlando dei criteri circa la protezione contro i corto circuiti, è stato detto che, una volta stabilita la sezione del conduttore, in modo che non sia danneggiato da un eventuale corto circuito, si dovranno scegliere gli interruttori di massima in modo che il loro potere di sezionamento sia superiore alla corrente di corto circuito da interrompere.

E' pertanto necessario richiamare brevemente i fenomeni che si determinano in queste apparecchiature allorchè si verifica l'interruzione dell'arco.

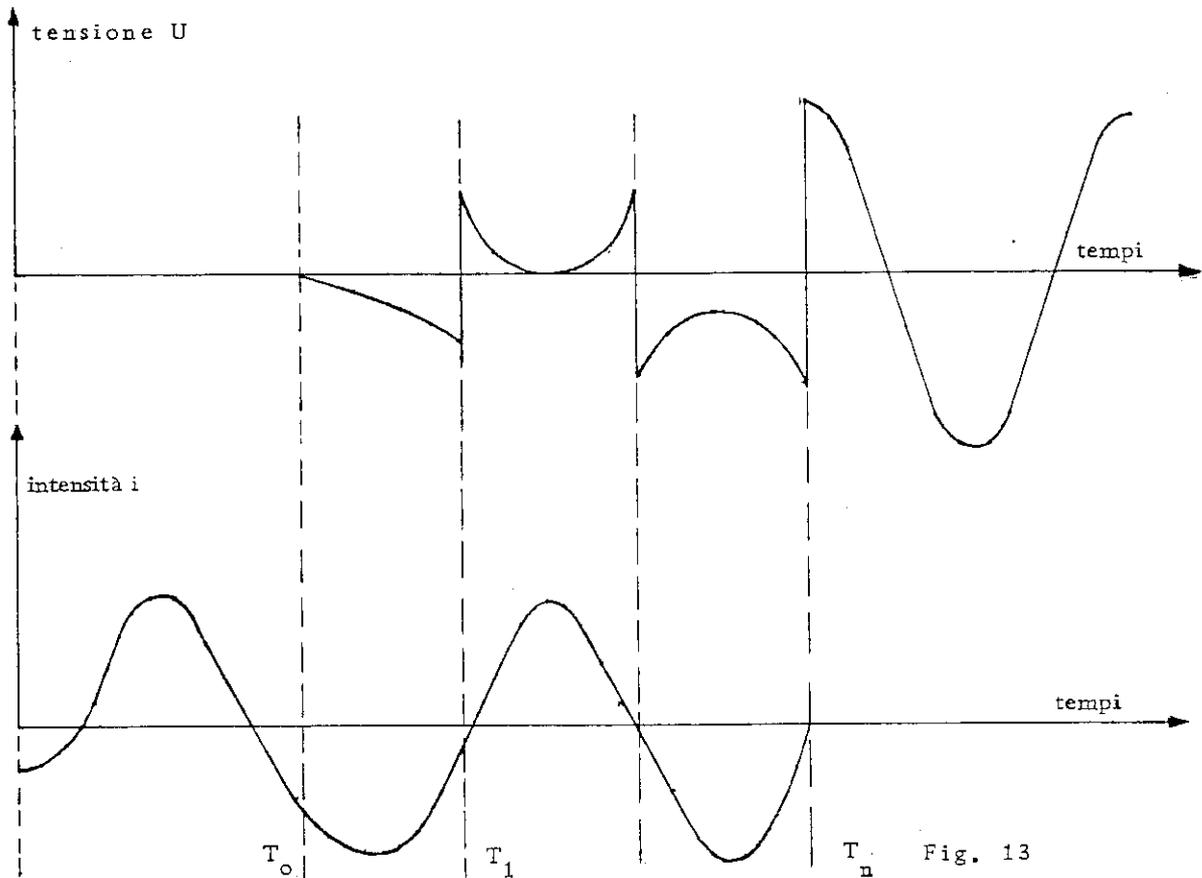
La definizione tecnica di un interruttore di massima è quella di un interruttore la cui apertura si produce automaticamente. In un interruttore di massima la chiusura dei contatti avviene con uno sforzo meccanico che mette in tensione un sistema di molle; al cessare dello sforzo, il sistema di molle rimane in tensione per effetto di un fermo meccanico. Queste molle, liberate automaticamente dal fermo, provocano la separazione dei contatti e l'apertura del circuito.

Malgrado la notevole mole degli studi eseguiti, non si hanno nozioni precise sul fenomeno di rottura dell'arco elettrico alternativo di grande potenza, mentre il principio fisico di rottura di un arco in corrente continua consiste nell'allungamento dell'arco, che si determina al distacco dei contatti sino a quando l'energia che il mezzo ambiente (o l'agente deionizzante) applicato toglie all'arco, sia superiore all'energia che il circuito tagliato fornisce.

Con la corrente alternata si è cercato di realizzare l'interruzione approfittando dell'estinzione naturale dell'arco nel momento in cui la corrente passa per il valore zero, cercando di inserire tra i poli un dielettrico capace di opporsi al riinnesco dell'arco stesso. Sino a che l'interruttore è chiuso, tra i poli non vi è alcuna tensione, allorchè si innesca la rottura, appare tra i due poli una tensione oscillante, detta tensione d'arco.

Detta tensione, contrariamente alla legge di Ohm, cresce man mano che la intensità registrata decresce; al momento in cui la corrente sinusoidale si annulla, la tensione segna una punta, poi inverte bruscamente il suo sen-

so, secondo l'oscillogramma teorico di figura 13, ricavato per un interruttore in olio.



La tensione che si ristabilisce ai poli, prende il nome di tensione di ristabilimento. L'andamento riportato nel diagramma, riguardante correnti sfasate di 90° sulla tensione, è essenzialmente teorico.

Altri fenomeni entrano in gioco durante la rottura, il loro studio però esula dagli scopi del corso e dunque di essi non faremo cenno.

Un interruttore di massima è caratterizzato dal suo potere di interruzione, che viene definito come la più grande intensità di corrente che l'apparecchio è capace di interrompere sotto una data tensione di ristabilimento ed in determinate condizioni di impiego, senza deteriorarsi e senza eccessive manifestazioni interne.

All'esterno è possibile calcolare gli interruttori di massima solo in base al valore della intensità di corrente di corto circuito permanente, trascurando sia la componente continua, sia il valore massimo della corrente alternata, di cui l'intensità di corrente alternata di corto circuito permanente è

una frazione.

Per illustrare meglio questo concetto, consideriamo brevemente ciò che avviene in un circuito monofase, alimentato da una forza elettromotrice alternativa $U \sin(\omega t)$ ed impedenza $Z = R + jL\omega$. Si ammette l'ipotesi semplificativa di una tensione e di una induttanza costanti.

Il fenomeno del corto circuito è definito dall'equazione differenziale

$$L \frac{di}{dt} + Ri = U \sin(\omega t + \theta)$$

dove θ è la fase dell'onda di tensione all'inizio del fenomeno (istante $t = 0$).

Dall'integrazione dell'equazione si ricava:

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + L^2 \omega^2}} \left[-e^{-\frac{R}{L} t} \cdot \sin(\theta - \varphi) + \sin(\omega t + \theta - \varphi) \right]$$

θ caratterizza, come già detto, la fase dell'onda di tensione all'istante $t = 0$ di chiusura del circuito; φ è lo sfasamento della corrente sulla tensione a regime.

Come risulta dalla relazione scritta, la corrente di corto circuito è la somma di una componente continua di forma esponenziale che va estinguendosi rapidamente, e di una componente alternata. I valori istantanei della corrente di corto circuito nel loro andamento generale, sono riportati in figura 14.

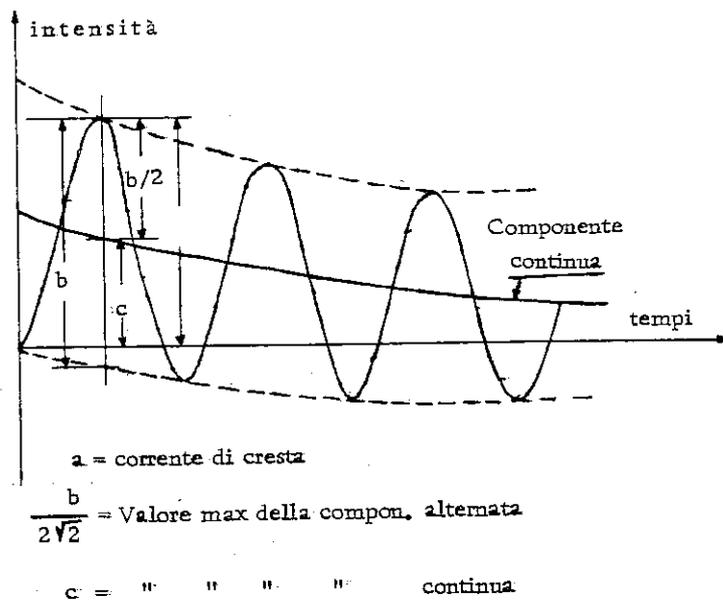


Fig. 14

Evidentemente, a seconda del momento in cui avviene il corto circuito, il valore della corrente è maggiore o minore. Si trascura la componente alternata transitoria dovuta ai circuiti magnetici dei generatori.

Elementi caratteristici di un corto circuito sono:

- a) l'intensità di cresta, cioè il valore massimo iniziale della corrente al momento in cui si stabilisce il corto circuito, somma del valore massimo della componente alternata e della componente continua. Al valore di questa intensità sono dovuti gli effetti meccanici che si producono in un corto circuito, e ad essa deve essere rivolta soprattutto l'attenzione dei costruttori delle apparecchiature;
- b) il valore della corrente di corto circuito permanente, cioè quello che si ha quando non si risente più della componente esponenziale continua. Esso dipende nettamente dalla natura del corto circuito ed è massimo per un corto circuito tripolare. Dipende ancora dall'alternatore, dallo stato di carico di questo e dalla distanza del corto circuito dall'alternatore.

Generalmente si calcola questa corrente diminuendo il valore massimo della componente della corrente alternata di una quantità proporzionale al rapporto tra la massima corrente alternata e la corrente nominale dell'alternatore. In formula, chiamando J_{cp} la corrente di corto circuito permanente, I_{ma} la corrente massima alternata, J_n la corrente nominale dello alternatore, si ha:

$$I_{cp} = \mu \cdot I_{ma} \quad \text{dove} \quad \mu = f \left(\frac{I_{ma}}{J_n} \right)$$

- c) il valore massimo della componente alternata, che interessa conoscere nell'esercizio di una linea elettrica, perchè in caso di corto circuito tripolare, a questo si deve adattare il potere di rottura degli interruttori di massima e non alla corrente permanente come avviene all'esterno.

Questo valore viene calcolato tenendo conto che, al momento della produzione di un corto circuito, la tensione si innalza di circa il 10%. Pertanto nel corto circuito tripolare il valore di questa intensità di corrente è:

$$J_{ma} = \frac{1,1 U}{\sqrt{3} \cdot Z}$$

essendo U la tensione concatenata e Z l'impedenza per fase della rete percorsa dal corto circuito.

Nel calcolo degli interruttori all'esterno, si considera il valore della corrente di corto circuito permanente e non il valore massimo della corrente alternata, perchè prima che si sia vinta l'inertza dell'interruttore passa un certo tempo, durante il quale la intensità della corrente diminuisce, per cui l'interruzione avviene sotto tale carico. Pertanto il potere di interruzione di un interruttore all'esterno può essere inferiore di circa il 20% della massima intensità di corrente di un corto circuito.

S2Ge

ti

sic

del

rai

-

-

le

le

rer

la

indi

e d

sior

ohm

li.

arri

e ch

- 10

CAPITOLO IV

I FENOMENI DI ELETTROCUZIONEStudio della sicurezza dal punto di vista dei pericoli di elettrocuzione in una rete di distribuzione in sotterraneoGeneralità

Gli incidenti dovuti all'elettrocuzione, pur essendo meno impressionanti (perchè interessano poche persone per volta) degli incidenti dovuti all'accensione del grisù o agli incendi, nella statistiche degli infortuni derivanti dall'uso dell'energia elettrica hanno un'incidenza percentuale notevolissima.

Le conoscenze sul meccanismo dell'elettrocuzione portano a considerare come mortali, alla frequenza adottata in miniera, correnti di

- 50 milliampere in corrente continua
- 25 milliampere in corrente alternata.

Queste cifre presentano un largo margine di sicurezza, ma sono quelle sulle quali ci si deve basare per studiare un impianto dal punto di vista delle possibilità di elettrocuzione.

Certi autori ammettono che il tempo necessario affinché una tale corrente risulti mortale è come minimo $1/5$ di secondo.

Per definire la tensione pericolosa occorre evidentemente conoscere la resistenza del corpo umano: questa resistenza è variabile da individuo a individuo, e nello stesso individuo varia in funzione delle condizioni ambientali e delle modalità con le quali avviene il contatto con l'apparecchiatura sotto tensione. Si ritiene comunque che la resistenza del corpo umano vada da 2000 ohm in condizioni normali a 1000 ohm in condizioni particolarmente sfavorevoli.

Con i valori citati nei quali sono compresi i margini di sicurezza, si arriva a definire la tensione che non presenta alcun pericolo di elettrocuzione e che ha i valori di:

- $1000 \times 0,025 = 25$ volts in corrente alternata

- 1000 x 0,050 = 50 volts in corrente continua.

In Germania invece il regolamento consente di assumere rispettivamente 1300 Ohm e 0,050 ampere in corrente alternata, il che porta a considerare pericolose le tensioni superiori a 65 volts.

Date le tensioni minime utilizzate in miniera (500 V.), qualunque contatto del corpo umano tra due fasi risulta pertanto mortale.

Ma il predetto contatto difficilmente si verifica e, generalmente, si ha a che fare con un contatto tra una fase e la terra, (mai un contatto franco), con interposta di solito un'elevata resistenza.

Interviene inoltre il tempo di contatto, che per i valori sopra indicati di corrente e tensione, è di circa 1/5 di secondo; costituisce dunque già norma di sicurezza quella di provare se un'apparecchiatura elettrica è sotto tensione con la punta delle dita, in modo da poter interrompere facilmente il contatto se si avesse sensazione di corrente, in un tempo inferiore a quello pericoloso.

Se potessero, inoltre, usarsi relè elettronici invece che elettromagnetici, il tempo di distacco, dovuto all'inerzia dell'apparecchiatura, passerebbe da valori dell'ordine di 0,2 secondi a valori di 0,01 secondi e si otterrebbe così un notevole miglioramento della sicurezza contro il pericolo di elettrocuzione.

Correnti Ohmiche

Iniziamo ora lo studio della sicurezza da elettrocuzione per una rete a bassa tensione con il neutro isolato, perchè il tipo di distribuzione più usata.

Si adottano le seguenti ipotesi semplificative:

- a) si trascurano i fenomeni di capacità,
- b) si suppone il contatto con le fasi nude da parte dell'individuo.

Abbiamo visto che affinché vi sia pericolo, in questo caso è necessario supporre, come del resto avviene in pratica, che la corrente si chiuda attraverso i difetti di isolamento delle fasi non toccate dall'uomo.

Indichiamo con E la tensione di fase della rete, con V la differenza di potenziale tra il punto neutro e la terra, dovuta allo squilibrio tra fasi, a

causa della differenza di isolamento tra le fasi stesse, e con α l'operatore che fa ruotare un vettore di $2/3 \pi$.

Detto \bar{E} il vettore che rappresenta la fase in contatto con l'uomo, i vettori che rappresentano le altre due fasi, saranno $\alpha \bar{E}$ e $\alpha^2 \bar{E}$ mentre le tensioni fase-terra avranno rispettivamente i valori

$$\bar{V} + \bar{E} \quad ; \quad \bar{V} + \alpha \bar{E} \quad ; \quad \bar{V} + \alpha^2 \bar{E}$$

Sia inoltre (figura 15) R la resistenza del corpo umano che si interpone tra una fase e la terra, ed R_s le resistenze che le altre due fasi hanno verso la terra. Le intensità di corrente saranno rispettivamente:

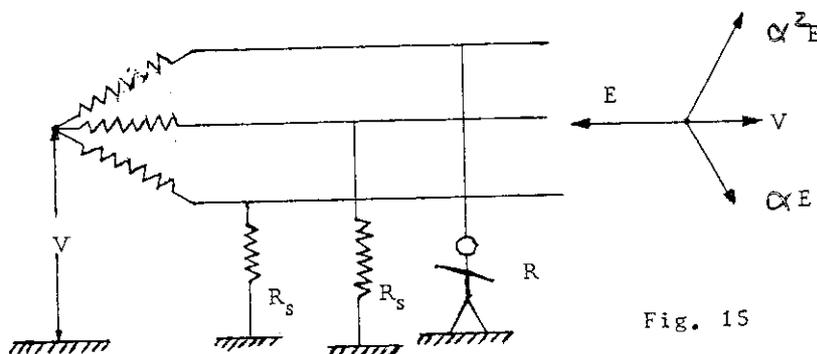


Fig. 15

$$i' = \frac{\bar{V} + \bar{E}}{R}$$

$$i'' = \frac{\bar{V} + \alpha \bar{E}}{R_s}$$

$$i''' = \frac{\bar{V} + \alpha^2 \bar{E}}{R_s}$$

La rete è in equilibrio allorchè la somma vettoriale di queste tre correnti è nulla:

$$i' + i'' + i''' = \frac{\bar{V} + \bar{E}}{R} + \frac{\bar{V} + \alpha \bar{E}}{R_s} + \frac{\bar{V} + \alpha^2 \bar{E}}{R_s} = 0$$

da cui

$$2V + (\alpha + \alpha^2) E R + (V + E) R_s = 0$$

aggiungendo e sottraendo RE , e notando che $1 + \alpha + \alpha^2 = 0$, si ottiene:

$$(2V - E) R + (V + E) R_s = 0$$

da cui

$$V = E \frac{R - R_s}{2R + R_s}$$

e sostituendo questo valore nelle relazioni delle intensità di corrente:

$$i' = \frac{E \left(\frac{R - R_s}{2R + R_s} + 1 \right)}{R} = E \frac{3}{2R + R_s} \quad (1)$$

Ma i' è in fase con E (perchè il circuito è ohmico), per cui, avendo trascurato i fenomeni capacitivi e chiamando i_s la corrente minima mortale, il limite di sicurezza delle fasi sane sarà:

$$R_s = \frac{3E}{i_s} - 2R$$

ottenuta dalla

$$i_s = \frac{3E}{2R + R_s}$$

Assumendo come valori medi $I_s = 25$ milliampere, $R = 1000$ ohm, si ottiene il valore di isolamento che devono avere le fasi in funzione di E , che è la tensione di fase della rete.

Tensioni della rete	Isolamento minimo di sicurezza : $R = 1000$ ohm, $i = 0,025$ A	Isolamento minimo di sicurezza: $R = 1300$ ohm, $i = 0,050$ A
380/220	24.400	10.600
430/250	28.000	12.400
500/290	34.800	14.800
660/380	43.000	19.300

Questi valori dell'isolamento sono facili da raggiungere purchè le reti di distribuzione siano soggette a buona manutenzione e siano sorvegliate con cura.

Ma in miniera il contatto franco con una fase difficilmente si verifica. Può invece avvenire che una fase vada a contatto con gli involucri delle apparecchiature (carter, guaina del cavo, etc...) ed attraverso questi si scarica a terra, tramite il circuito di terra, di cui devono essere attrezzate le apparecchiature elettriche. Il pericolo di elettrocuzione sussiste per la possibilità che l'operaio tocchi l'involucro che si trova sotto una tensione residua funzione della tensione della rete, della resistenza del circuito di terra e dell'isolamento delle altre due fasi.

Per determinare il valore della tensione residua occorre determinare la intensità i_t della corrente di fuga, il cui valore è dato dalla formula (1), ove alla resistenza R del corpo umano viene sostituita la R_t del circuito di terra.

Tanto più piccolo sarà i_t tanto minore sarà la tensione residua nei carter.

Il valore di questa tensione residua sarà dato da:

$$U_r = R_t i_t$$

Per diminuire dunque il pericolo di elettrocuzione occorre contemporaneamente diminuire il valore di i_t e di R_t .

Misura di sicurezza contro l'elettrocuzione è dunque quella di collegare i carter delle apparecchiature elettriche alla terra e di controllare accuratamente l'isolamento della rete stessa onde aumentare il valore di R_s .

Per fare un esempio supponiamo che il difetto del circuito (distribuzione con neutro isolato) avvenga ad una certa distanza (per esempio un km) dalla sottostazione, che il circuito di terra sia inoltre costituito da un conduttore di 50 mmq e che la resistenza della presa di terra sia di 10 ohm (figura 16).

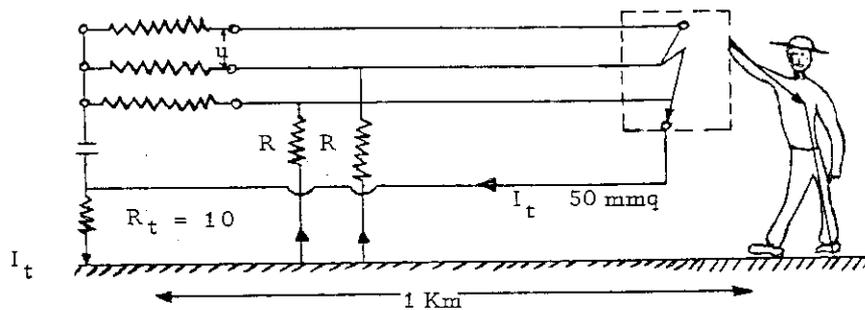


Fig. 16

Ammettendo nel caso peggiore (salvo il difetto che determina la dispersione e la conseguente messa a massa dell'apparecchiatura) la fase difettosa sia nelle altre parti isolata e che le altre due fasi abbiano un uguale isolamento.

La corrente che circola nel conduttore di terra sarà:

$$i_t = \frac{3 E}{2R_t + R_s} = U \frac{\sqrt{3}}{2R_t + R_s}$$

essendo U la tensione concatenata ed E quella tra fase e terra ($U/\sqrt{3} = E$).

Abbiamo pertanto che $R_t = 10 \text{ ohm} + 0,358 \text{ ohm}$, essendo $0,358 \text{ ohm}$ la resistenza del conduttore di 50 mmq.

Supponendo che R_s sia uguale a 5.000 ohm, resistenza invero molto debole per un isolamento dei cavi di miniera, il valore di i_t diventa:

$$i_t = \frac{U \sqrt{3}}{2 \times 10,358 + 5.000} = 0,00034 U$$

La tensione residua sul carter che determina l'elettrocuzione sarà:

$$U_r = R_t i_t = 10,358 \times 0,00034 U$$

valore che per tensione tra fase e fase di 500 V, dà un valore di $i_t = 0,17$ A ed un valore di $U_t = 1,7$ V.

Pertanto un uomo, la cui resistenza sia di 1000 ohm, che venga a contatto con il carter di un'apparecchiatura, sarà percorso da una corrente di elettrocuzione la cui intensità è:

$$i_c = 1,7/1000$$

Questa corrente è inferiore ai limiti massimi ammessi dai regolamenti di polizia mineraria.

Se si fissasse nelle carcasse una tensione residua inferiore a 25 Volt (tensione massima ammessa), si potrebbe dire che non vi sarebbe pericolo di elettrocuzione toccando i carter se:

$$i_t \cdot R_t \leq 25 \quad \text{cioè} \quad i_t \leq 25/R_t$$

Ciò vuol dire che più piccola è la resistenza di terra, più è facile che la corrente i_t sia inferiore al rapporto $25/R_t$ con conseguente minor pericolo.

Il valore della corrente i_t , che è limitata dalla disuguaglianza su scritta, dipende dagli altri fattori visti precedentemente; sostituendo al valore i_t nella espressione.

$$i_t = \frac{U \sqrt{3}}{2R_t + R_s}$$

si ha:

$$\frac{25}{R_t} \geq \frac{U \sqrt{3}}{2R_t + R_s}$$

Ricavando R_s si ottiene il valore minimo che la resistenza della rete deve avere perchè non vi sia pericolo di elettrocuzione:

$$R_s \geq R_t \cdot \frac{U \cdot \sqrt{3} - 50}{25}$$

sostituendo ai valori di R_t i valori della resistenza di terra per le varie tensioni, si ottengono i valori minimi di R_s sotto riportati.

U	R_s		
	$R_t = 10 \text{ ohm}$	$R_t = 50 \text{ ohm}$	$R_t = 100 \text{ ohm}$
380 Volt	244	1220	2440
500 Volt	324	1620	3240
660 Volt	436	2180	4360

Questi valori di R_s , molto bassi e facilmente raggiungibili in un circuito in sotterraneo, si mantengono sempre sullo stesso ordine di grandezza per i diversi valori delle tensioni, per cui con delle buone messe a terra, agli effetti del pericolo di elettrocuzione, le tre tensioni sono equivalenti.

Correnti capacitive

Sin'ora si è tralasciato di considerare le correnti che sorgono nell'armatura del cavo per effetto di capacità.

Un cavo armato, con tre conduttori attivi, costituisce un condensatore che presenta 4 armature aventi delle capacità determinate. Mentre il fenomeno può essere trascurato nel caso di cavi non protetti, esso ha notevole importanza nel cavo armato, perchè, nel caso di messa a terra, si creano delle correnti capacitive che si aggiungono alle correnti di fuga, aumentando così il pericolo di elettrocuzione.

Le diverse capacità tra i conduttori di un cavo e la sua armatura, possono essere rappresentate nel modo seguente, mostrato in figura 17.

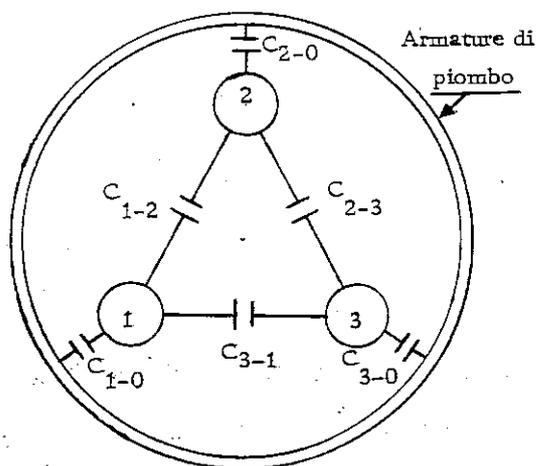


Fig. 17

Per ragioni di simmetria si ha:

$$C_{1-0} = C_{2-0} = C_{3-0} = C_0$$

$$C_{1-2} = C_{2-3} = C_{3-1} = C$$

Vettrialmente rappresentiamo la rete senza fughe con un diagramma nel quale si suppongono uniti la guaina in piombo, l'armatura di protezione ed il

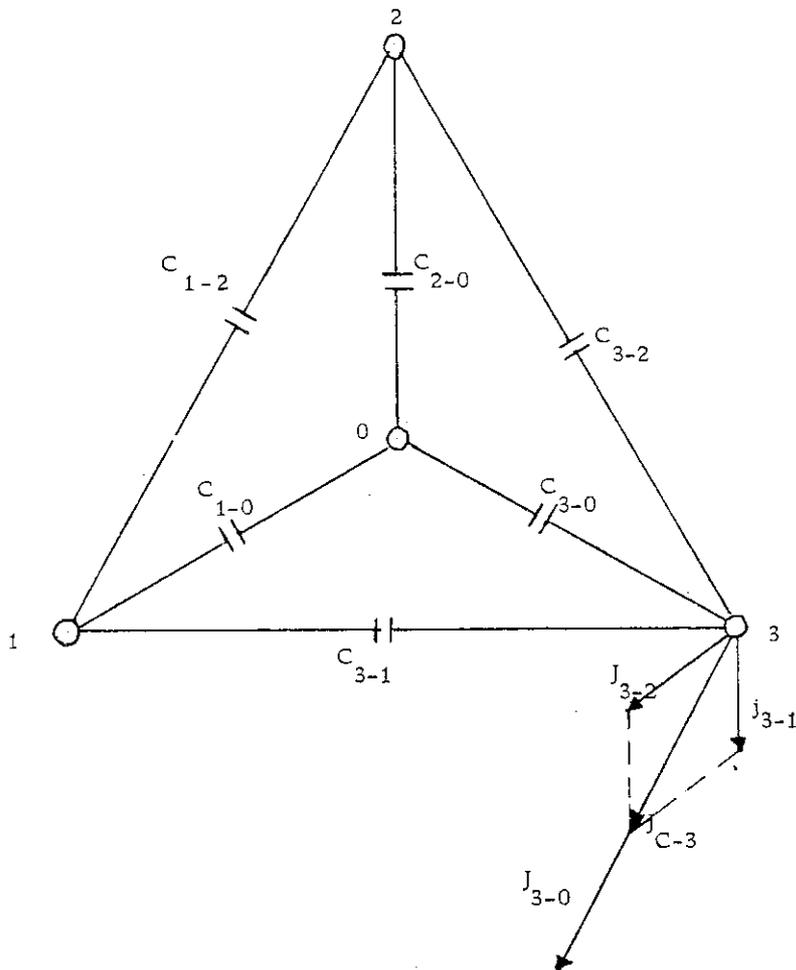


Fig. 18

neutro (figura 18).

La corrente capacitiva, relativa ad un conduttore, è la risultante delle tre correnti corrispondenti ai tre condensatori che fanno capo al conduttore in esame.

Queste correnti sono sfasate in anticipo di 90° sulle corrispondenti tensioni. Per esempio, la corrente capacitiva relativa al conduttore 3 è la risultante di tre correnti corrispondenti ai condensatori C_{3-1} , C_{3-2} , C_{3-0} . Se chiamiamo con U la tensione tra le fasi e con w la pulsazione, tale che $w = 2\pi \cdot f = 314$, per $f = 50$, il valore delle correnti capacitive è:

$$J_{3-1} = wCU \quad ; \quad J_{3-2} = wCU \quad ;$$

$$J_{3-0} = wC_0 \cdot \frac{U}{\sqrt{3}}$$

La risultante delle correnti J_{3-1} e J_{3-2} è in fase con la corrente J_{3-0} , essendo l'angolo tra 3-1 e 3-2 bisecato da 3-0.

Il valore numerico della risultante sarà dunque:

$$J_{C-3} = wCU \cdot \sqrt{3} + wC_0 \cdot \frac{U}{\sqrt{3}}$$

$$J_{C-3} = \frac{wU}{\sqrt{3}} (3C + C_0)$$

Lo stesso valore hanno le correnti capacitive degli altri due conduttori, le quali sono però sfasate di 120° .

Se ora supponiamo, sempre nel caso di neutro isolato che una fase sia francamente a terra (fase 1), senza l'intermediario di alcuna resistenza,

av
du

Ide:

avremo che il punto neutro non è più al centro, ma si è sovrapposto al conduttore che è andato a terra (figura 19).

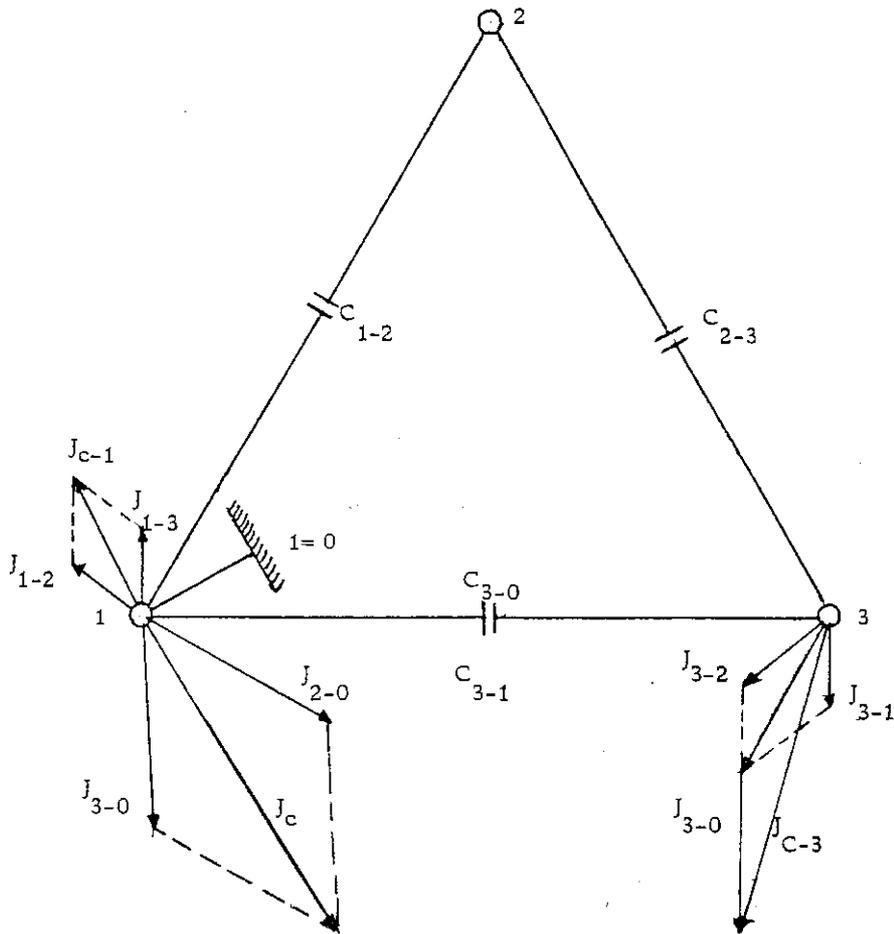


Fig. 19

La tensione delle due fasi sane in riferimento alla terra non è più la tensione di fase $E = U / \sqrt{3}$, ma la tensione concatenata U .

Le correnti capacitive che circolano nel conduttore 3 sono allora:

$$J_{3-1} = \omega C U \quad \text{sfasata di } \pi/2 \text{ rispetto a } 3-1$$

$$J_{3-2} = \omega C U \quad \text{sfasata di } \pi/2 \text{ rispetto a } 3-2$$

$$J_{3-0} = \omega C_0 U \quad \text{sfasata di } \pi/2 \text{ rispetto a } 3-0$$

La risultante, essendo l'angolo formato da J_{3-1} e J_{3-2} pari a 60° , sarà:

$$J_{C-3} = \omega U \sqrt{3 C (C + C_0) + C_0^2}$$

Identico risultato avremo per quanto riguarda il calcolo della J_{C-2} .

Il conduttore 1 che è a terra è percorso dalla corrente capacitiva corrispondente alla capacità tra il conduttore 1 ed i conduttori sani 2 e 3.

Essendo diventata nulla la corrente capacitiva J_{1-0} , in quanto la fase 1 è andata a terra, nel conduttore 1 si avrà una corrente capacitiva data dalla risultante delle J_{1-2} e J_{1-3} , cioè:

$$J_{C-1} = J_{1-2} + J_{1-3} = wCU \cdot \sqrt{3}$$

Pertanto le tre correnti capacitive J_{C-1} , J_{C-2} e J_{C-3} non sono più equilibrate e quindi dovranno essere equilibrate da una corrente che circola nel punto dove la fase 1 è andata a terra. Questa corrente tende ad aumentare le tensioni residue nel carter aumentando il pericolo di elettrocuzione. Il suo valore è:

$$J_c = J_{3-0} + J_{2-0} = w C_0 U \cdot \sqrt{3}$$

In realtà, una fase va a terra con l'interposizione di una certa resistenza, in tal caso si genera una corrente il cui valore è inferiore al valore che assume la corrente capacitiva quando la fase è francamente a terra.

Per i cavi normalmente usati in sotterraneo, i valori della capacità C_0 sono:

Sezione dei cavi mmq.	Cavi isolati in carta (Cap.fase-armatura per km) $\mu F/km$	cavi isolati in gomma (Cap.fase-armatura per km) $\mu F/km$
3 x 10	0,16	0,35
3 x 25	0,20	
3 x 50	0,24	
3 x 05	0,29	0,61

Per le dimensioni massime adottate in sotterraneo (sezione 3 x 95 mmq), si hanno le massime capacità sotto riportate:

- Cavo a B.T. 3 x 95 mmq - isolato in carta

a) conduttori circolari	$C_0 = 0,29 \mu F/km$;	$C = 0,12 \mu F/km$
b) conduttori settoriali	$C_0 = 0,43 \mu F/km$;	$C = 0,12 \mu F/km$

- Cavo a B.T. 3 x 95 - isolato in gomma

a) conduttori circolari	$C_0 = 0,61 \mu F/km$;	$C = 0,23 \mu F/km$
b) conduttori settoriali	$C_0 = 0,91 \mu F/km$;	$C = 0,23 \mu F/km$

Con questi valori della capacità, e con tensione $U = 500$ volt, il contatto diretto dell'uomo con una fase determinerebbe elettrocuzione, infatti la corrente capacitiva che attraversa l'uomo in contatto con una fase, è, per km di cavo della sezione di 3×95 mmq:

$$J_c = 500 \cdot \sqrt{3} \times 0,29 \times 314 \times 10^{-6} = 0,079 \text{ A} - \text{per cavo isolato in carta};$$

$$J_c = 500 \cdot \sqrt{3} \times 0,61 \times 314 \times 10^{-6} = 0,164 \text{ A} - \text{per cavo isolato in gomma}.$$

Il solo fatto della presenza di una corrente capacitiva così elevata, ha costretto, nella ricerca della sicurezza, a dare la massima importanza a tutte le apparecchiature che hanno lo scopo di rendere impossibile, o per lo meno difficile, che un operaio venga a diretto contatto con una fase. Si sono così utilizzati dispositivi al fondo che tolgono la tensione ai conduttori prima che si possa toccarli. In particolare, tutte le porte delle apparecchiature (interruttori di massima, valvole, etc..) sono dotate di interruttori che interrompono automaticamente il circuito non appena vengono aperte.

La sicurezza contro i pericoli di elettrocuzione si ottiene se tutte le apparecchiature sono state messe a terra, in modo che sul carter sussista in ogni caso una tensione residua molto debole.

Il calcolo risulta di più facile intelligenza se fatto con un esempio.

Sia una rete di 500 volt, lunga 10 km e costituita da 6 rami in parallelo, la cui potenza installata sia di 50 kw per ramo, pari cioè a $6 \times 50 = 300$ kw, essendo questa la potenza della sottostazione. Ogni ramo sia lungo circa 1,5 km.

I cavi siano costituiti da tre conduttori settoriali di 95 mmq, isolati in gomma.

La corrente capacitiva normale della rete di distribuzione supposta perfettamente isolata, per una lunghezza L , sarà:

$$J_c = \frac{U}{\sqrt{3}} w (3 C + C_0) L$$

e sostituendo i valori numerici:

$$J_c = \frac{500}{\sqrt{3}} 314 (0,69 + 0,91) 10 \times 10^{-6} = 1,45 \text{ A}$$

Se ora nella stessa rete si avesse una fase a terra, la corrente capacitiva delle fasi sane, secondo quanto già esaminato sopra sarà:

$$J_c = wU \sqrt{3 C (C + C_0) + C_0^2} L =$$

$$= \sqrt{500 \cdot 314 \cdot 0,69 (0,23 + 0,91) + 0,91^2} \cdot 10 \cdot 10^{-6} = 2 \text{ A}$$

La corrente capacitiva della fase difettosa è invece:

$$J_{c'} = 3 wUCL = 3 \cdot 500 \cdot 314 \cdot 0,23 \cdot 10 \cdot 10^{-6} = 0,625 \text{ A.}$$

e pertanto la corrente che equilibra le correnti capacitive e circola nei carter, quella cioè per la quale si ha pericolo di elettrocuzione, è

$$J_c = 3 wUC_0L = 3 \cdot 314 \cdot 500 \cdot 0,91 \cdot 10 \cdot 10^{-6} = 2,48 \text{ A.}$$

Naturalmente, se consideriamo che difficilmente si ha in un circuito una fase francamente a terra, il valore di 2,48 A è un valore notevolmente più elevato di quello che si può avere in pratica.

Questa corrente capacitiva si somma vettorialmente alla corrente di fuga ohmica, il cui valore si determina come visto precedentemente. A tale scopo, supponiamo che ciascuno dei 6 cavi di partenza abbia un valore di isolamento di 6000 ohm ($R_s = 6000 \text{ ohm}$). I 6 cavi, posti in parallelo danno per l'isolamento della rete:

$$R = 6000/6 = 1000 \text{ ohm}$$

La corrente di fuga, ammettendo una resistenza di terra di 10 ohm sarà:

$$I_r = \frac{U \cdot 3}{2R_t + R} = \frac{500 \cdot 3}{2 \cdot 10 + 1000} = 0,85 \text{ A}$$

La corrente che risulta nel circuito di terra sarà la somma vettoriale della corrente capacitiva e di quella ohmica; noi però abbiamo calcolato la corrente capacitiva come se la fase fosse francamente a terra, per cui la corrente risultante sarà sicuramente inferiore alla somma vettoriale:

$$I_r = 2,48^2 + 0,85^2 = 2,58 \text{ A}$$

Se la fuga avviene attraverso la carcassa di una apparecchiatura, su questa si ha una tensione residua inferiore a $U = 2,58 \cdot 10 = 25,8 \text{ V}$ che non costituisce pericolo pur essendosi assunte le condizioni peggiori e valori maggiori di quelli che in realtà si verificano.

Circuiti di terra - Prese di terra :

La sicurezza in sotterraneo, come visto, presuppone l'esistenza di un buon circuito di terra caratterizzato da bassa resistenza, in modo da rendere minime le tensioni residue nella carcassa delle apparecchiature che con questa terra sono collegate. Mettere a terra una apparecchiatura elettrica significa infatti stabilire un collegamento conduttore elettrico fra l'apparecchiatura elettrica e il suolo.

Un circuito di terra è composto, nel suo disegno generale, dagli elementi seguenti:

- resistenza di contatto tra la carcassa da proteggere ed il conduttore di terra;
- resistenza del conduttore di terra;
- resistenza tra il conduttore di terra e la presa di terra vera e propria;
- resistenza della presa a terra;
- resistenza di contatto tra la presa di terra e il terreno;
- resistenza del terreno.

Per definizione il valore della resistenza del terreno è dato dal rapporto tra i valori della differenza di potenziale tra la presa di terra ed un punto scelto opportunamente, diviso la differenza dell'intensità di corrente misurata alla presa di terra ed all'altro punto. I punti scelti e la presa di terra debbono stare sui vertici di un triangolo equilatero. Aumentando la distanza dalla presa di terra il rapporto V/I tende ad un limite che è la resistenza di terra cercata. In pratica ci si può limitare ad una distanza di 20 metri.

Le prese di terra non presentano nessun pericolo di elettrocuzione in una rete di distribuzione in sotterraneo, dato lo scarso valore della tensione di passo (si intende per tensione di passo la differenza di potenziale tra due punti la cui distanza misurata radialmente rispetto alla presa di terra è un metro). In condizioni eccezionali però questa differenza di potenziale può innescare del grisù, non è inutile pertanto raccomandare di stabilire la presa di terra in sotterraneo possibilmente nelle gallerie di entrata d'aria e fuori dai luoghi ove circola il personale.

PORTATA DI UNA PRESA DI TERRA

La portata di una presa di terra dipende dalla superficie che possiedono gli elettrodi utilizzati per realizzare la presa di terra stessa. Si ammette in generale che basta 1 dmq di superficie per far fluire facilmente 1 ampere. Questa superficie è fortemente ridotta quando si mantiene umido il suolo e quando questo sia carico di sali.

In alcuni paesi si ritiene che la presa di terra al fondo non sia efficace per cui è stimato necessario riportare la rete di terra a giorno. Questa opinione è errata potendosi al fondo avere delle prese di terra ottime in funzione naturalmente dei terreni nei quali questa è sistemata, e seguendo alcune norme particolari qui di seguito riportate.

La conduttanza dei conduttori di terra è fissata dai regolamenti di polizia mineraria: il valore minimo di essa deve essere pari a quella del conduttore attivo più grosso con un massimo di conduttanza uguale a quella di un conduttore di rame di 50 mmq.

Come del resto abbiamo già detto nelle reti di distribuzione a media tensione si usa la guaina in piombo del cavo stesso, che si costruisce in modo che abbia conduttanza uguale a quella massima prevista.

Nei cavi a bassa tensione invece, che non siano rigidi, il conduttore di terra deve essere per regolamento incluso nel cavo stesso.

Il conduttore di terra dovrà essere di tanto in tanto collegato con una presa di terra che è bene sia costituita da masse metalliche che non hanno niente a che fare con la rete di distribuzione (ad es. tubazioni di aria compressa), però si corre il rischio di mettere sotto tensione di fuga apparecchiature non elettrificate delle quali non si diffida.

Particolare cura deve essere usata nelle connessioni del circuito di terra perchè se esse non sono ben realizzate fanno aumentare notevolmente la resistenza di tale circuito. Il regolamento di Polizia mineraria italiano stabilisce che in ogni caso la resistenza di terra non deve superare 5 ohm.

La presa di terra che è risultata la più idonea ha un disegno del tipo di figura 20

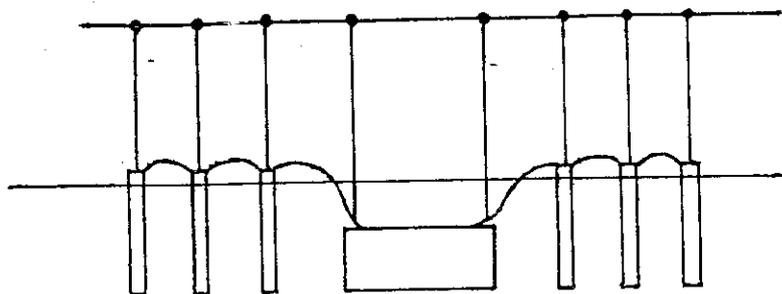


Fig. 20

Il conduttore di terra è collegato a tubi di 34 mm di diametro, distanti fra loro m.2 ed affondati per un metro, nel suolo. Inoltre una piastra di lamiera di 1 mq. posta verticalmente viene

intercalata fra essi. Naturalmente la resistenza della presa di terra è funzione del tipo di terreno che si incontra; in linea generale può dirsi che i terreni colorati presentano una resistenza notevolmente inferiore agli altri per la presenza di sali metallici disciolti.

Esemplificando negli scisti grigi della Lorena si ha una resistenza con una presa di terra siffatta inferiore ai 10 ohm, mentre in quelli colorati tale valore scende sotto i 3 ohm.

Se la terra non può essere bagnata, le prove debbono essere fatte con terra allo stato naturale.

CONTROLLO DELL'ISOLAMENTO DI UNA RETE

Per garantire la sicurezza contro i pericoli della elettrocuzione nelle reti a neutro isolato, oltre ad una buona presa di terra, è necessario mettere in opera una rete di distribuzione che sia effettivamente isolata.

L'isolamento è funzione della estensione della rete; più una rete è piccola e semplice, minor pericolo di fuga essa presenta.

L'isolamento è inoltre funzione della qualità del materiale usato e quindi una spesa di impianto maggiore comporta maggiore sicurezza.

La rete deve essere mantenuta nel modo migliore possibile, e grande cura si deve avere anche nell'immagazzinamento del cavo elettrico. Ciononostante le condizioni di lavoro che si riscontrano in miniera sono tali da far deperire rapidamente il migliore materiale, per cui è necessario attuare un controllo continuo dello isolamento.

La misura di isolamento si fa saltuarimente con un voltmetro di terra la cui resistenza è di 2.000 ohm e che viene collegato volta a volta con una fase secondo lo schema riportato.

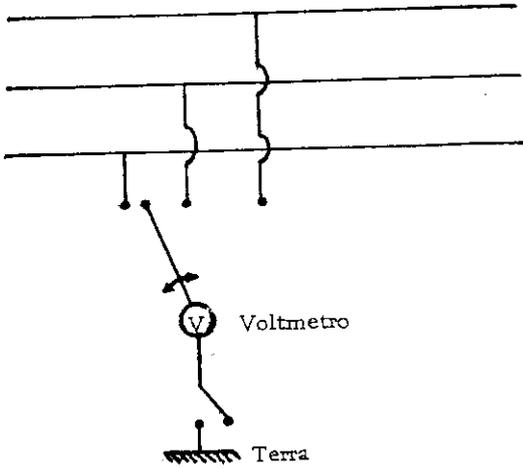


Fig. 21

Altrimenti si possono usare delle lampade al neon fisse che non lasciano passare la corrente se non si ha una determinata differenza di potenziale. In questo modo però non si scindono le correnti capacitive da quelle di fuga.

Sono state messe in opera pertanto apparecchiature basate sul principio di immettere nella rete una corrente di misura di debole potenza prodotta da una sorgente di corrente continua che elimina praticamente gli effetti della capacità stessa della rete. Questi apparecchi sono montati sulla rete stessa ed hanno un funzionamento continuo, segnalando le fughe o con apparecchi acustici o con apparecchi luminosi o addirittura tagliando la corrente quando l'isolamento della linea sia sceso sotto un certo valore.

Ma se queste apparecchiature sono idonee per garantire la sicurezza nelle reti che alimentano apparecchiature fisse, è necessario prendere maggiori precauzioni nel caso di apparecchiature mobili alimentate da cavi flessibili. Infatti queste apparecchiature mobili sono molto esposte a maltrattamenti insiti nel lavoro minerario ed i cavi sono molto facilmente esposti alla rottura.

Se non appena messo in opera l'impianto elettrico, questo non presenta pericoli eccessivi, questi diventano notevoli non appena si verifica un guasto, per cui non è sufficiente la sua semplice segnalazione, ma occorre che, appena avvenuto, si abbia l'interruzione della corrente e che questa non possa venire reinserita se non dopo che il guasto sia stato agguistato come realizzato con le apparecchiature di controllo già accennate,

nella descrizione dei cavi a bassa tensione.

Comunque le apparecchiature di controllo dell'isolamento dello impianto hanno il grosso difetto di non essere selettive, per cui ad un guasto consegue l'interruzione di tutta la rete di distribuzione a valle del trasformatore.

MANUTENZIONE PROGRAMMATA

INTRODUZIONE

L'introduzione nelle miniere di macchine di grande potenzialità, ha consentito di aumentare la produttività delle coltivazioni e di diminuire, quindi, il numero di cantieri contemporaneamente in attività.

Ma la concentrazione della produzione in pochi cantieri è vantaggiosa solo se le macchine utilizzate non subiscono avarie che determinano l'arresto completo, o quasi, del ciclo produttivo sino alla riparazione del guasto. Infatti l'avaria, oltre alle spese di riparazione, comporta ingenti spese, poichè una importante quota del costo di produzione è indipendente dalla entità del materiale prodotto e permane costante anche quando la miniera si ferma, almeno per brevi periodi. Perchè la concentrazione dei cantieri rappresenti un vantaggio è necessario che l'arresto della macchina (che non è eliminabile) non giunga improvviso, ma avvenga in un momento preventivamente stabilito ed opportunamente inserito nel ciclo produttivo.

Per realizzare questa condizione indispensabile per la riuscita della meccanizzazione si è andata sviluppando una tecnica di manutenzione programmata, che cerca di eliminare le avarie con controlli accurati e frequenti, o addirittura con la sostituzione del pezzo meccanico a data fissa, qualunque siano le sue condizioni di usura.

La scelta del tipo di intervento e la frequenza del controllo è possibile solo dopo aver acquisito la conoscenza della vita di un determinato organo o di una determinata macchina; questa conoscenza è acquisibile solo con il rilevamento minuzioso del lavoro svolto in passato dall'organo in osservazione o da altri organi dello stesso tipo e con la elaborazione statistica dei dati del rilevamento.

Ciò comporta una organizzazione complessa della contabilità industriale che deve essere opportunamente impostata servendosi dei dati forniti da uffici di manutenzione appositamente creati. Ne risulta un maggior onere amministrativo che è però ampiamente compensato dai vantaggi della continuità del ciclo di lavoro.

Generalità -

Per poter affrontare il problema è necessario definire con esattezza i termini relativi alla manutenzione. Si definisce:

- 1) - "elemento" indifferentemente una macchina semplice, costituita da un solo organo, o una macchina complessa, costituita da un insieme di organi.
- 2) - "manutenzione ordinaria" quel complesso di operazioni periodicamente realizzate comprendenti la lubrificazione e la pulizia dell'elemento.
- 3) - "manutenzione straordinaria" le operazioni di maggior impegno che vanno dalla riparazione alla sostituzione dell'elemento avariato.

Gli interventi citati nei punti 2) e 3) sono già realizzati in tutte le imprese, ma la manutenzione straordinaria è programmata ad intervalli di tempo fissati in generale senza alcuna conoscenza delle reali necessità essa risulta, spesso, o insufficiente ad eliminare avarie impreviste, o fonte di spese di manutenzione estremamente gravose.

La suddivisione degli interventi possibili nelle due categorie succitate non è sufficiente a programmare adeguatamente la manutenzione per cui l'intervento di cui al punto 3) sarà ancora suddiviso in:

a) - La riparazione. L'intervento avviene quando un elemento è in avaria per ripararlo o sostituirlo. Comporta oltre alle spese di riparazione, la perdita di produzione con le conseguenze economiche che da questa derivano.

b) - La riparazione sistematica: prevede a scadenza fissa la sostituzione degli elementi anche se dovessero risultare ancora efficienti. Comporta la sola spesa di sostituzione, poichè la programmazione avrà avuto cura di scegliere il periodo di fermata in modo da non intralciare la produzione.

c) - La manutenzione preventiva: realizzata con l'ispezione periodica degli elementi. Si suddivide in ispezione sommaria ed ispezione dettagliata.

I risultati delle visite sono riportati in schede di forma e colore diversi a seconda dell'urgenza dell'eventuale intervento. Le spese rela

tive comprendono quelle del personale controllore (che deve essere altamente qualificato e responsabile) e quelle dei materiali sostituiti. Rispetto all'intervento di cui al punto b) questo è più oneroso per quanto riguarda le spese di controllo ma consente una forte contrazione delle spese per i materiali.

Si porta ad esempio di manutenzione preventiva la organizzazione realizzata nella miniera di ferro di Moinville in Lorena.

Il servizio di manutenzione dopo un periodo di studio preliminare (necessario per la valutazione statistica del tempo medio di usura dei diversi organi delle macchine in dotazione) ha programmato un piano di revisione dei diversi organi nel quale la frequenza delle revisioni è proporzionale alle probabilità di avaria. Le ispezioni sono così suddivise: due volte la settimana visita sommaria a tutte le macchine per controllarne le parti meccaniche; due volte al mese è prevista per ogni macchina una giornata di fermata per controllare le parti elettriche e quelle meccaniche. Si eseguono contemporaneamente anche le riparazioni riconosciute necessarie durante le visite sommarie.

Agli addetti al controllo sono distribuite schede di manutenzione ove è dettagliatamente elencato il programma di ispezione. Le schede sono restituite al centro di manutenzione con i risultati della ispezione e l'elenco delle riparazioni necessarie riportate in ordine di urgenza.

Il centro provvede a dare le disposizioni per la successiva visita fornendo il materiale occorrente.

Sono così controllati sette gruppi Joy che sono contemporaneamente in marcia; ogni gruppo è costituito da un jumbo di perforazione, una caricatrice ed un carro spola.

In media la spesa mensile di manutenzione per le 150.000 t prodotte nello stesso periodo è di 2300 ore lavorative per la manutenzione straordinaria ed ordinaria e di Lire 3.500.000 per i materiali esclusi i lubrificanti.

Al mese, in media, gli interventi per avarie impreviste hanno portato all'arresto delle macchine per un totale del 4% del tempo complessivo di lavoro.

Per poter scegliere il tipo di manutenzione straordinaria che consen

ta il massimo vantaggio occorre conoscere le probabilità di avaria degli elementi che si considerano ed il costo di ogni intervento.

Se è relativamente facile individuare il valore unitario delle diverse voci di spesa riguardanti la manutenzione, più difficile è la stima della probabilità di avaria poichè trattasi di una probabilità a posteriori. Si deve cioè prevedere la probabilità che un determinato elemento si guasti esaminando il comportamento di elementi simili nelle stesse condizioni di impiego. Trattasi di valutare una probabilità dallo esame delle frequenze ignorando la legge di distribuzione da valutare a sua volta con l'esame del campione.

Il problema può solo essere risolto statisticamente dopo aver acquisito con l'esame di numerosi elementi i dati necessari per la individuazione dei parametri caratteristici della popolazione esaminata.

ELABORAZIONE DEI DATI RELATIVI CON L'INDAGINE PRELIMINARE -

Sia N_0 il numero di elementi di uguale specie sui quali è stato effettuato il controllo. Gli elementi possono essere stati messi in opera sia contemporaneamente sia in periodi diversi, purchè la prestazione che a questi si richiede sia uguale e siano uguali le caratteristiche di resistenza dei diversi elementi. Al controllo preliminare e degli elementi e delle condizioni di lavoro, segue, una volta ricavati i dati statistici, la verifica della omogeneità della popolazione del campione, il controllo cioè che essi appartengano tutti ad un'unica popolazione statistica.

Si ipotizza che gli elementi considerati siano stati messi in opera contemporaneamente. Il tempo di lavoro sarà suddiviso in periodi la cui ampiezza dipende dalla vita presunta degli elementi che si considerano.

Se $N(1)$ è il numero di elementi sopravvissuti dopo il primo periodo di funzionamento il numero di elementi avariati nel primo periodo sarà:

$$N(0) - N(1)$$

Si suppone, per semplificare, che tutti i pezzi $N(0) - N(1)$ abbiano cessato di funzionare alla fine del primo periodo.

Dopo il secondo periodo sopravvivono $N(2)$ elementi, etc.; se $N(t)$

è il numero di elementi sopravvissuti dopo t periodi gli elementi eliminati nei t periodi sarà:

$$N(0) - N(t)$$

La proporzione dei sopravvissuti è uguale al rapporto tra il numero degli elementi presenti alla fine del periodo t (e cioè $N(t)$) ed il numero di elementi messo originariamente in servizio.

$$s(t) = \frac{N(t)}{N(0)}$$

$s(t)$ tende a 0 con l'aumentare di t .

L'andamento della funzione $s(t)$, detta dei "sopravvissuti", varia con il tipo di elementi considerati e per gli stessi elementi con le condizioni di impiego.

Tra i diversi andamenti che può assumere $s(t)$ due in particolare sono caratteristici, corrispondendo essi alle sole forme di avaria teoricamente possibili.

a) - il primo è rettangolare $s(t) = 1$ per $t < t$, mentre per $t > t$, si ha $s(t) = 0$.

La forma di avaria che determina l'andamento della $s(t)$ sopra indicato è l'usura perfetta. La vita di tutti gli elementi è costante, ogni elemento cioè è atto a svolgere quel determinato periodo di lavoro dopo il quale diventa inservibile se non si interviene a ripararlo.

Se N lampade identiche lavorassero con la stessa tensione e nelle stesse condizioni ambientali, la funzione dei sopravvissuti avrebbe appunto un andamento rettangolare.

b) - il secondo è esponenziale $s(t) = e^{-\alpha t}$; esso corrispondente ad una avaria per fatica; la rottura di un elemento è puramente casuale. Il numero di elementi che entrano in avaria alla fine di ogni periodo è proporzionale al numero di pezzi esistenti all'inizio del periodo.

Infatti il numero di pezzi avariati nel periodo t è dato da

$$s(t-1) - s(t) = e^{-\alpha(t-1)} - e^{-\alpha t}$$

$$e^{-\alpha t + \alpha} - e^{-\alpha t} = e^{-\alpha t} (e^{\alpha} - 1)$$

Il rapporto tra il numero dei pezzi avariati e quelli presenti all'inizio del periodo $t - 1$ sarà dato da:

$$\frac{s(t-1) - s(t)}{s(t-1)} = \frac{e^{-\lambda t} (t-1)}{e^{-\lambda (t-1)}} = \frac{e^{-\lambda t} (e^{\lambda} - 1)}{e^{-\lambda t} \cdot e^{\lambda}} = \frac{e^{\lambda} - 1}{e^{\lambda}}$$

che è costante al variare di t .

In realtà la curva di sopravvivenza è determinata dall'azione contemporanea dei due tipi di avarie su indicati, ed assume forme intermedie tra le due teoriche citate.

Si definisce "mortalità assoluta" il numero di elementi rotti nel periodo t e cioè

$$N(t-1) - N(t)$$

essendo

$$N(t-1) \approx N_0 s(t-1) \quad \text{e} \quad N(t) \approx N_0 s(t)$$

la mortalità assoluta esposta in termini di sopravvivenza risulta

$$N_0 [s(t-1) - s(t)]$$

La "mortalità relativa" è riferita al numero totale di elementi messi in funzione nel periodo (0); essa risulta

$$s(t-1) - s(t)$$

La "mortalità ristretta" è invece la proporzione di elementi avariati nel periodo $s(t-1) - s(t)$ riferito al numero di elementi presenti all'inizio del periodo $s(t-1)$

$$\frac{N(t-1) - N(t)}{N(t-1)}$$

espressa in termini di sopravvivenza diventa:

$$1 - \frac{s(t)}{s(t-1)}$$

Si definisce "vita media di un elemento" il tempo medio di lavoro degli elementi della popolazione. Il suo valore può solo essere stimato poiché

non si conoscono tutti gli elementi che costituiscono la popolazione. La vita media è uguale al rapporto tra i periodi di vita totalizzati dagli elementi ed il numero di elementi.

Il primo periodo sarà stato effettuato da tutti gli elementi ivi compresi quelli scomparsi alla fine del primo periodo; questi ultimi avranno compiuto un numero di periodi dato da

$$[N(0) - N(1)] \cdot 1$$

Il secondo periodo sarà superato da tutti gli elementi $N(1)$ tra i quali compresi gli $N(1) - N(2)$ elementi scomparsi dopo il 2° periodo; questi ultimi avranno vissuto periodi

$$2 [N(1) - N(2)]$$

Gli elementi scomparsi dopo il 3° periodo avranno vissuto periodi:

$$3 [N(2) - N(3)]$$

Quelli scomparsi dopo t periodi avranno vissuto periodi:

$$t [N(t-1) - N(t)]$$

La somma delle espressioni sopra riportate esprime il numero di periodi vissuti in totale da tutti gli elementi

$$E = \sum_{t=1}^{\infty} t \frac{N(t-1) - N(t)}{N_0} = E = \sum_{t=1}^{\infty} t [s(t-1) - s(t)]$$

che può scomporsi in

$$\begin{aligned} & \sum_{t=1}^{\infty} [(t-1) + 1] [s(t-1) - s(t)] = \\ & = \sum_{t=1}^{\infty} (t-1) s(t-1) + \sum_{t=1}^{\infty} s(t-1) - \sum_{t=1}^{\infty} [(t-1) + 1] s(t) \\ & = \sum_{t=1}^{\infty} (t-1) s(t-1) + \sum_{t=1}^{\infty} s(t-1) - \sum_{t=1}^{\infty} t s(t) \quad (1) \end{aligned}$$

In realtà la sommatoria varia tra 1 e t_f poichè tutti gli elementi dopo un certo tempo sono avariati. Conseguente da ciò che l'ultimo termine della sommatoria $t s(t)$ cioè $t_f s(t_f)$ è uguale a zero perchè $s(t_f) = 0$; il primo termine della sommatoria $(t-1) s(t-1)$ è anche esso uguale a 0 poichè per $t = 1$ si ha $(t-1) = 0$.

Se ne conclude che la prima e l'ultima sommatoria della espressione (1) si eliminano perchè uguali e di segno opposto.

La vita media risulta pertanto:

$$E = \sum_{1}^{\infty} s(t-1)$$

tale sommatoria è data da $s(0) + s(1) + s(2) + \dots + s(t-1)$; considerando anche qui che $s(t)$ per un valore t finito è uguale a 0 potremo scrivere

$$E = \sum_{0}^{t} s(t)$$

La vita media di una popolazione di elementi è uguale alla sommatoria della funzione di sopravvivenza.

Considerando che la indagine è portata su di un campione e non su tutta la popolazione, il valore trovato consente solo una stima della vita media; la stima è tanto più attendibile quanto più numeroso è il campione esaminato.

Se la curva di sopravvivenza è ottenuta con un numero di campioni elevato, la probabilità che un elemento permanga in efficienza oltre il periodo t è poco diversa dalla frequenza $s(t)$.

Assimiliamo i pezzi sopravvissuti dopo t periodi cioè $N(t)$ a delle sfere bianche e quelli avariati $N_0 - N(t)$ a sfere nere. La probabilità che dopo t periodi si estragga una sfera bianca è data dal rapporto tra i casi favorevoli e quelli totali. I casi favorevoli sono $N(t)$ mentre quelli totali $N(0)$ quindi

$$P = \frac{P(t)}{P(0)} s(t)$$

Una stima della varianza della vita media degli elementi così rilevati, si ricava ricordando che questo parametro è dato da

$$\sum_{1}^{\infty} (t - E)^2 P_i$$

ove P_i è la probabilità afferente all'evento t ed è variabile da periodo a periodo; non conoscendo il valore della probabilità la si sostituisce con la frequenza del numero di pezzi che vivono nel solo periodo t .

Il numero di pezzi presenti all'inizio del periodo t è dato da $N(t-1)$ mentre quello dei presenti alla fine del periodo sarà dato da $N(t)$.

Il numero di pezzi che hanno vissuto durante t è dunque

$$N(t-1) - N(t)$$

che espresso in percentuale diventa

$$\frac{N(t-1) - N(t)}{N_0} = s(t-1) - s(t)$$

la varianza pertanto sarà

$$\sigma^2 = \sum_1^{\infty} (t-E)^2 [s(t-1) - s(t)]$$

Se non si conosce la funzione $s(t)$ della popolazione madre nulla si può dire delle probabilità afferenti ad un certo intervallo di confidenza, ma se gli effettivi sono numerosi, si può utilizzare la espressione di Bienajmé-Chebichef, sia riferita alla potenza seconda dello scarto, sia alla potenza quarta. Il teorema suddetto è così enunciato:

Detta E la vita media degli elementi considerati e σ lo scarto quadratico medio, la probabilità che la vita di un elemento sia contenuta nell'intervallo $E \mp K\sigma$ è superiore o uguale a

$$1 - \frac{1}{K^2}$$

La probabilità che dopo t periodi un elemento sia scomparso è invece fornita da

$$1 - P_v = P_m = \frac{N(0) - N(t)}{N(0)} = 1 - \frac{N(t)}{N(0)}$$

La probabilità invece che un elemento scompaia nel periodo t viene ricavata considerando che in questo periodo scompaiono

$$N(t-1) - N(t) \quad \text{elementi}$$

I casi possibili sono ancora $N(0)$ per cui la probabilità che un elemento scompaia nel periodo t è dato da

$$\frac{N(t-1) - N(t)}{N(0)} = s(t-1) - s(t) = P_m \tau$$

Cioè questa probabilità è uguale alla mortalità relativa.

Si definisce ancora probabilità condizionata di avaria la probabilità che un elemento in condizioni di funzionare alla fine del periodo $t-1$ non lo sia più alla fine del periodo t . Con analogo ragionamento diremo che

De

sti
inric
rà

a)

b)

mo

pe

ista

R(

que

ste

c)

per

d)

sor

P

P

rile

$$P_v(t) = \frac{N(t-1) - N(t)}{N(t-1)} = 1 - \frac{s(t)}{s(t-1)}$$

Determinazione del numero di elementi da sostituire dopo ogni periodo -

Soprattutto interessa conoscere il numero di elementi che occorre sostituire dopo un certo numero di periodi, perchè il numero totale di elementi in servizio sia sempre quello iniziale cioè $N(0)$.

Indichiamo con $R(t)$ il numero di elementi sostituiti alla fine del periodo t . Il numero di elementi che sono in servizio alla fine del periodo t sarà costituito da:

- a) - dagli elementi rimasti di quelli messi in servizio all'istante.
- b) - dagli elementi rimasti in vita di quelli messi in servizio alla fine del primo periodo. Se facciamo l'ipotesi che la curva dei sopravvissuti sia uguale per la serie messa in opera all'istante 0 e per quella messa in opera allo istante 1 avremo che il numero dei sopravvissuti di quest'ultima serie sarà $R(1) s(t+1)$ essendo $R(1)$ i pezzi sostituiti dopo il primo periodo. Perchè questa ipotesi si verifichi è necessario che tutti i pezzi appartengano alla stessa popolazione statistica.
- c) - degli elementi rimasti in vita di quelli messi in opera dopo il secondo periodo,
- d) - etc. etc.

Il numero di elementi presenti dopo il periodo t sarà uguale alla somma dei sopravvissuti delle diverse serie

$$N s(t) + R(1) s(t-1) + R_2 s(t-2) + \dots + R(t-1) s(1) + R(t) = N_0$$

$$N_0 = R(0) = \sum_0^{t-1} R(u) s(t-u) + R(t)$$

Il numero di pezzi da sostituire sarà dunque:

$$R(t) = N - \sum_0^{t-1} R(u) s(t-u)$$

Il calcolo è però impreciso; infatti la funzione dei sopravvissuti è rilevata statisticamente e non si conosce il suo intervallo di confidenza.

Ammissa comunque valida l'ipotesi della uguaglianza fra frequenza e probabilità (possibile solo se $N(0)$, che è servito per la determinazione della curva dei sopravvissuti, è molto grande) potremo facilmente calcolare $R(t)$, utilizzando la tabella di seguito riportata:

nel riquadro superiore si indichino i diversi periodi; e si riportino il numero di elementi presenti suddividendoli nelle serie alle quali appartengono

	0	1	2	3	4	
0	$R(0)$					$= N_0$
1	$R(1)$	$R(0) s(1)$				$= N_0$
2	$R(2)$	$R(1) s(1)$	$R(0) s(2)$			$= N_0$
3	$R(3)$	$R(2) s(1)$	$R(1) s(2)$	$R(0) s(3)$		$= N_0$
4						
∞	a_0	a_1	a_2	a_3		$= N_0$

All'istante 0 saranno in funzione N_0 elementi appartenenti alla serie $R(0) = N$. Dopo un periodo saranno ancora in vita $R(0) s(1)$ elementi riportati nella casella 1-1.

Si dovranno aggiungere $R(1)$ elementi per avere $R(0) s(1) + R(1) = N$. Il valore di $R(1)$ è riportato nella casella 1-0. Nel secondo periodo saranno in funzione $R(0) s(2)$ elementi della serie 0 ed $R(1) s(1)$ elementi della serie $R(1)$.

Il primo termine $R(0) s(2)$ viene collocato nella casella 2-2. Degli elementi della serie $R(1)$ rimangono $R(1) s(1)$ elementi sistemati nella colonna 1-2. Si dovranno ancora aggiungere $R(2)$ elementi per completare il numero N di elementi. La somma di ogni linea è uguale ad N .

L'andamento della funzione $R(t)$ indica che il numero di pezzi da sostituire è in un primo tempo molto piccolo per poi raggiungere un massimo e quindi tendere assintoticamente verso un valore costante che è uguale a a e che chiameremo R .

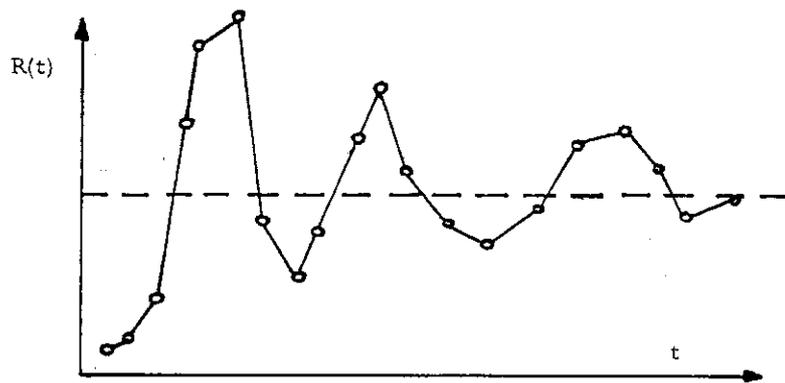
m
d
in
ti

D

cc
ur
ur
sc

e

cu



L'andamento della curva riportata in figura è generale. Infatti messo in servizio un gran numero di elementi, in un primo tempo il numero delle sostituzioni raggiunge valori elevati, per poi diminuire sino a oscillare intorno ad un valore relativamente piccolo. Il numero percentuale di elementi che si devono sostituire in un generico periodo t è invece

$$p(t) = \frac{R(t)}{N}$$

Distribuzione limite -

Il valore di $R(t)$ tende con l'aumentare di t ad un limite R . Di conseguenza il numero di elementi di una generica serie sopravvissuti dopo un periodo t tende anche esso verso un valore limite e quindi tende verso un limite il numero di elementi della generica serie a_0 che devono essere sostituiti dopo un generico periodo

$$a_1 = a_0 s(1)$$

$$a_2 = a_0 s(2)$$

$$a_3 = a_0 s(3)$$

Per definizione $\sum_{i=0}^{\infty} a_i = N_0$

e quindi

$$\sum_{i=0}^{\infty} a_i = \sum_{i=0}^{\infty} a_0 s(i) = a_0 \sum_{i=0}^{\infty} s(i)$$

Ma $\sum_{i=0}^{\infty} s(i)$ non è altro che la vita media della popolazione per cui

$$a_0 E = N$$

Per trovare il numero di elementi che bisogna sostituire una volta che si è a regime basta dividere il numero di elementi per la vita media.

Il numero percentuale di elementi da sostituire sarà invece l'inverso della vita media.

SCelta DEL TIPO DI INTERVENTO DA ADOTTARE

Si è già esposto quali siano i diversi tipi di intervento che possono realizzarsi per mantenere efficiente una determinata apparecchiatura.

La scelta di uno o dell'altro tipo di manutenzione è solo questione economica e quindi diversi casi devono essere esaminati separatamente. Si supponga di dover studiare la manutenzione di un apparecchio che comporti un solo elemento.

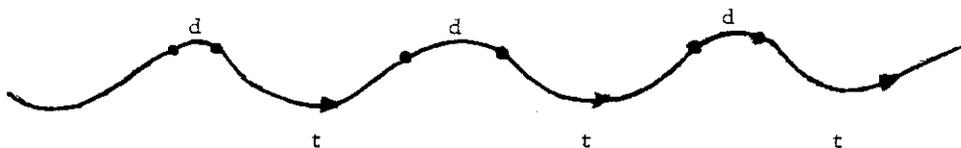
La "riparazione" non richiede la conoscenza della funzione di sopravvivenza, ma questa conoscenza è necessaria per la applicazione della "riparazione sistematica" o della manutenzione preventiva.

La durata dell'elemento è la variabile aleatoria t .

a) - Riparazione

Si supponga di conoscere il tempo necessario per sostituire il pezzo avariato. L'arresto avverrà in un momento non definito del ciclo di lavoro.

La marcia dell'apparecchio sarà caratterizzata da un grafico del tipo di quello sotto riportato.



In ognuno di questi cicli con ampiezza $> <$ di t si situa il periodo di riparazione \bar{d} .

La vita media dell'elemento sia E .

Le spese saranno p = costo del ricambio ; M costo per unità di tempo della mano d'opera; P = perdita determinata dell'arresto della pro-

duzione per un tempo unitario. Sia Q la produzione nell'unità di tempo; in un ciclo essa avrà valore Qt ; il suo valore medio per elemento sarà QE . Le spese medie saranno dunque per una produzione unitaria:

$$F'_d = \frac{p + (M + P) \bar{d}}{QE}$$

b) - Riparazione sistematica

Essa è eseguita dopo un tempo determinato che chiamiamo con

θ .

Si avrà per la riparazione la perdita di tempo \bar{r} , di solito minore di \bar{d} . La sostituzione sarà effettuata in un periodo scelto in modo che sia $p = 0$ o molto vicino.

Le spese saranno solo

$$p + M r$$

Le avarie impreviste non potranno essere eliminate ma saranno molto più rare che con la "Riparazione".

Il ciclo si suddivide in due sottocicli: Il sottociclo θ caratterizzato da un tempo di sostituzione r che avverrà con frequenza

$$s(\theta)$$

Il sottociclo t per $t < \theta$ caratterizzato da un tempo di riparazione d la cui frequenza è $1 - s(\theta)$. La curva dei sopravvissuti sarà limitata alla ascissa θ che rappresenta l'inizio di un nuovo ciclo, essa sarà dunque

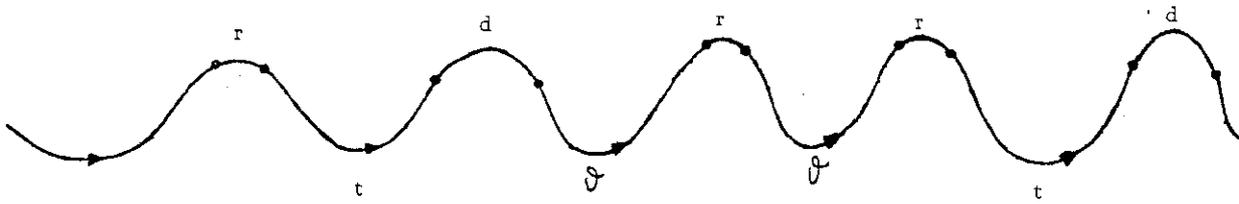
$$\sum_{0}^{\theta-1} s(t)$$

Il ciclo medio durerà quindi:

$$E_{\theta} + r s(\theta) + d [1 - s(\theta)]$$

dove E_{θ} è la vita media.

La curva sarà



Le spese per produzione unitaria saranno:

$$\frac{[p + (M+P) \bar{r}] s(\theta) + [p + (M+P) \bar{d}] [1 - s(\theta)]}{Q E \theta}$$

risolvendo

$$F_r(\theta) = \frac{[p + (M+P) \bar{d}] - (M+P) (\bar{r} - \bar{d}) s(\theta)}{Q E \theta}$$

La funzione $F_r(\theta)$ non è di facile calcolo ma può essere tabulata con estrema facilità. Siano: θ l'intervallo tra due sostituzioni ed $s(\theta)$ la funzione dei sopravvissuti. Il tempo medio sarà la $\frac{1}{\theta} s(\theta)$ valido per ogni periodo θ .

Si avrà la tabella seguente:

I	II	III	IV	V	VI	VII
θ	$s(\theta)$	$E \theta$	$p + (M+P) \bar{d}$	$(M+P)(\bar{d} - \bar{r})s(\theta)$	IV-V	$F_r = \text{VI/III}$
1	$s(1)$	1	-	$(M+P)(\bar{d} - \bar{r})s(1)$	IV-V	VI/III
2	$s(2)$	$1 + s(1)$		$(M+P)(\bar{d} - \bar{r})s(2)$	IV-V	VI/III
3	$s(3)$	$1 + s(1) + s(2)$				
4	$s(4)$	$1 + s(1) + s(2) + s(3)$				
5	$s(5)$					
6	$s(6)$					
7	$s(7)$					
8	$s(8)$					
9	$s(9) = 0$					

Nella colonna VII si otterrà dunque il valore delle spese totali che si devono effettuare facendo la sostituzione degli elementi dopo il primo periodo o dopo il secondo o dopo il terzo periodo etc.

Ad un certo periodo corrisponderà la spesa minima di manutenzione, funzione della curva dei sopravvissuti. La ricerca dunque deve essere effettuata caso per caso in funzione delle caratteristiche dell'elemento da mantenere.

Nel caso di una funzione di sopravvivenza rettangolare avremo che

$s(\vartheta) = 1$ se $\vartheta < E$ ed $s(\vartheta) = 0$ se $\vartheta > E$
e le spese diventano:

$$F_r(\vartheta) = \frac{p + (M+P)\bar{d} - (M+P)(\bar{d} - \bar{r})}{Q\vartheta} = \frac{p + (M+P)\bar{r}}{Q\vartheta}$$

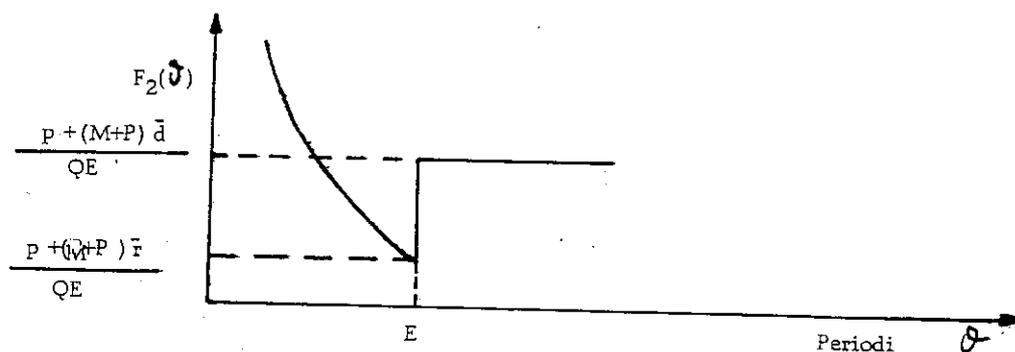
nel primo caso.

$$F_r(\vartheta) = \frac{p + (M+P)\bar{d}}{QE}$$

nel secondo.

Cioè nel primo caso l'intervento avviene sempre in tempo programmato mentre nel secondo l'intervento avviene sempre in tempo non programmato.

L'andamento della curva delle spese in funzione dei periodi è



Si conclude che nel caso teorico di pezzi di usura perfetti l'intervento più economico è quello di una manutenzione programmata in sostituzione dei pezzi. Logicamente il minimo si ottiene quando il tempo di sostituzione coincide con la vita media degli elementi.

Nel caso di una usura per fatica perfetta che è rappresentata da una curva dei sopravvissuti ad andamento esponenziale (corrispondente all'evento casuale) $s(t) = e^{-at}$ la spesa di manutenzione risulta:

$$F_r(\vartheta) = \frac{p+(M+P)d-(M+P)(d-r)e^{-\alpha\vartheta}}{Q \sum_0^{\vartheta-1} e^{-\alpha\vartheta}}$$

Ma $e^{-\alpha\vartheta} = (e^{-\alpha})^\vartheta$ che sviluppato in serie diventa:

$$1 + (e^{-\alpha})^1 + (e^{-\alpha})^2 + (e^{-\alpha})^3 \dots\dots\dots$$

la cui somma è

$$\frac{1 - e^{-\alpha\vartheta}}{1 - e^{-\alpha}} = \sum_0^{\vartheta-1} e^{-\alpha\vartheta}$$

da cui si ricava il valore di

$$F_r(\vartheta) = \frac{1 - e^{-\alpha\vartheta}}{Q(1 - e^{-\alpha\vartheta})} \left[p + (M+P)\bar{d} - (M+P)(\bar{d}-r) e^{-\alpha\vartheta} \right]$$

funzione decrescente con ϑ il cui limite per ϑ grande

$$E_r(\vartheta) = \frac{1}{Q} (1 - e^{-\alpha}) \left[p + (M+P)\bar{d} \right]$$

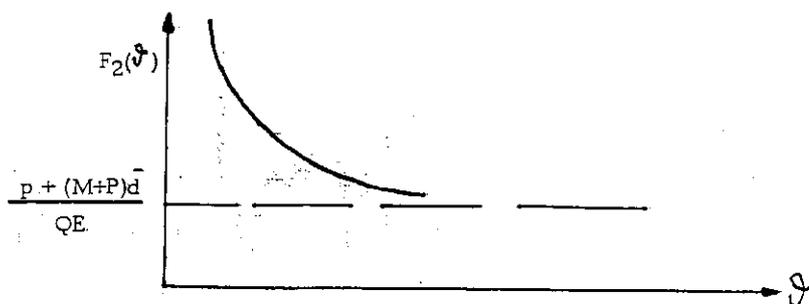
e posto che

$$E = \sum_0^{\infty} s(t) = \sum_0^{\infty} e^{-\alpha\vartheta} = \frac{1 - e^{-\alpha\vartheta}}{1 - e^{-\alpha}}$$

se ϑ è grande diventa $E = \frac{1}{1 - e^{-\alpha}}$; cioè le spese per ϑ grande tendono a:

$$F_r(\vartheta_0) = \frac{p+(M+P)\bar{d}}{Q.E}$$

che rappresenta il limite della funzione $F_r(\vartheta)$



Tale limite inferiore di spesa è quello della "Riparazione". Quindi nel caso di avaria per fatica è più conveniente attendere l'avaria.

Si rilevi però che ciò è valido solo nel caso che la perdita di produzione dovuta all'arresto dell'attività per un tempo unitario sia uguale sia nel caso di avaria imprevista sia nel caso di sostituzione prima programmata, cioè effettuata prima che avvenga l'avaria. Ciò in generale non si verifica.

Le spese dunque della riparazione dovranno caso per caso essere valutate tenendo conto della influenza reale della perdita di produzione.

c) Manutenzione preventiva

L'ultimo tipo di manutenzione elencato prevede l'ispezione dell'elemento prima di decidere se sostituirlo o meno; l'opportunità dell'intervento è dunque lasciata al giudizio del controllore.

La manutenzione preventiva non ha interesse per gli elementi che si rompano per fatica poichè il loro controllo è difficile, mentre può essere vantaggiosa nel caso di usura.

Se indichiamo con ϑ l'intervallo di tempo che separa due visite, l'avaria può sopraggiungere nell'intervallo di tempo ϑ con una spesa di riparazione che è in questo caso

$$p + (M + P) \bar{d}$$

Se tra le due visite nessuna avaria sopraggiunge il tecnico ha due diverse possibilità: a) lasciare l'elemento in servizio con spesa $M \bar{V}$ dove \bar{V} è il tempo speso per la ispezione. Questa è inferiore a \bar{r} e naturalmente a \bar{d} ; b) - cambiare o riparare l'elemento perdendo oltre al tempo \bar{V} anche il tempo \bar{r} necessario per la riparazione.

Intervengono dunque due nuovi parametri di non facile valutazione.

Il primo riguarda la stima delle condizioni dell'elemento che allo inizio di un nuovo ciclo di lavoro ha già una sua usura; questa stasi potrebbe essere ricavata dalla curva di sopravvivenza.

Il secondo, molto più aleatorio, riguarda l'esattezza della decisione dell'addetto al controllo.

La difficoltà del giudizio cresce come cresce la vita media dell'elemento. Infatti se su 100 elementi che il controllore esamina devono essere sostituiti 40 ed il controllore ritiene, per incuria o con criterio pru-

denziale, di sostituirli tutti, sbaglia solo il 60% delle sue decisioni mentre il 40% è esatto. Naturalmente molto dipende dalla capacità del controllore.

Questo non può essere giudicato dal numero di avarie fortuite che si determinano durante il lavoro.

Infatti il controllore poco accurato decide di cambiare tutti gli elementi poichè questa decisione allontana le avarie e conseguentemente la sua chiamata in causa, e difficilmente gli elementi eliminati vengono riesaminati poichè sono di solito gettati via.

PROGRAMMAZIONE DELLA MANUTENZIONE

Per superare le difficoltà insite nella scelta dei diversi sistemi di manutenzione, occorre che i dati del problema siano fissati; devono essere cioè preliminarmente conosciuti i seguenti dati:

- ore di marcia dell'elemento;
- perdite di produzione;
- durata della riparazione;
- costo della riparazione;
- curva di sopravvivenza dell'elemento;
- numero dei periodi per i quali si desidera assicurare la marcia dell'apparecchio.

Un esempio di calcolo per la determinazione del programma di manutenzione che consente il minimo di costo meglio chiarisce la via da seguire nella progettazione.

Si debba assicurare la vita di un elemento durante sei periodi di lavoro. Dopo ogni periodo l'elemento deve essere ispezionato da personale competente e che lavori con impegno.

Alla fine di ogni periodo si possono presentare due casi:

- a) - l'elemento è in avaria;
- b) - l'elemento è ancora in attività.

In questo secondo caso, dopo l'ispezione, è possibile una scelta, e cioè:

- b') lasciare l'elemento in funzionamento;

b") sostituirlo.

I parametri caratteristici siano i seguenti:

- perdite per mancata produzione L.10.000
- la riparazione dura un periodo;
- spesa per giornata di mancato lavoro. 4.000 L.
- costo di riparazione Lire 1.000
- periodi di attività n°6
- La funzione dei sopravvissuti sia la seguente:

Periodo	Probabilità di sopravvivere $s(t)$
1	0,99
2	0,97
3	0,93
4	0,77
5	0,48
6	0,18

Quindi la probabilità di avaria (per quanto precedentemente detto) è

$$P = 1 - \frac{s(t)}{s(t-1)}$$

Si adotterà la seguente tabulazione che rende meno complicata la progettazione:

- 1) - Al tempo 0 vi è un elemento di età 0
- 2) - Dopo il primo periodo di lavoro esso può essere in avaria (punto B) o in funzionamento (punto C).
- 3) - Dal punto B

Se è in avaria dovrà essere sostituito e quindi punto D.

- 4) - Se è funzionante dal punto C (a seconda della scelta fatta dall'ispettore potrà essere sostituita e quindi punto D o continuare a lavorare e quindi spostarsi al punto E).
- 5) Dal D effettuata la riparazione ci si ritroverà al punto F e da questo al punto M con un elemento nuovo nelle stesse condizioni che al punto A.
- 6) - Dal punto C.

Se l'ispettore decide di cambiarlo si va al punto D.

7) - Se l'ispettore ritiene di lasciarlo al lavoro ci si sposta al punto E.

8) - In questo punto si è nuovamente nel caso del punto A con la differenza però che l'elemento ha già avuto un periodo di lavoro, e quindi la probabilità di rottura al punto E è superiore a quella del punto A.

9) - Non è dunque difficile proseguire con lo stesso ragionamento sino al punto 6.

Naturalmente ogni decisione comporta una spesa certa, anche in sede di preventivo. L'evento "avaria" è invece probabile; il lavoro della probabilità si ricava dalla curva dei sopravvissuti e per quanto già precedentemente detto essa vale

$$P_{\text{rob}} = \left(1 - \frac{s(t)}{s(t-1)} \right)$$

La spesa dunque che dovrà probabilmente effettuarsi in sede di preventivo non deve essere conteggiata per intero ma pesata con la probabilità. Se la spesa di riparazione è X la spesa da conteggiare nel progetto sarà

$$X P_{\text{rob}}$$

Il costo dell'intervento di manutenzione più economico si fa dopo aver tracciato il diagramma partendo dalla fine dei periodi per i quali si vuole assicurare il funzionamento dell'elemento considerato.

1) - Punto 5'-r. Per giungere al periodo 6 occorre sostituire (o riparare) l'elemento con una spesa certa di $L.1.000 + 4.000 = 5.000$

2) - Punto 5'-0. Per giungere al periodo 6 si hanno due possibilità:

2a) - L'elemento potrebbe essere in avaria; ciò comporterebbe una perdita di produzione pari a 10.000 lire. Ma l'evento non è certo e quindi la spesa dovrà essere pesata dalle probabilità; cioè

$$10.000 \left(1 - \frac{s(1)}{s(0)} \right) = 10.000 (1 - s(1)) = 10.000 (0,01) = 100$$

Infatti $s(0) = 1$ ed $s(1)$ con la curva dei sopravvissuti rilevata è uguale a 0,01: il pezzo è giunto al punto 5' - 0 dopo essere stato riparato al punto 5' - r e quindi la probabilità di avaria corrisponde a quella

del primo periodo.

2b) - Il pezzo non ha bisogno di alcun intervento e giunge al punto 6 - 1 dopo un solo periodo di lavoro.

3) - Punto 5'-1. Anche in questo caso due possibilità.

3a) - L'elemento potrebbe essere in avaria. In questo caso la probabilità di avaria corrisponde a quella del secondo periodo di lavoro; in base alla curva dei sopravvissuti rilevata, il valore della probabilità di sopravvivere sarebbe $s(2) = 0,97$ e quella di avaria

$$1 - \frac{s(2)}{s(1)} = 1 - \frac{0,97}{0,99} = 0,0202$$

La spesa pesata con le probabilità risulta di

$$10.000 \times 0,0202 = \text{Lire } 202$$

3b) - Il pezzo non ha bisogno di interventi e giunge al punto 6-2 dopo aver lavorato in totale 2 periodi.

4-5-6) Punti 5-2; 5-3; 5-5. Per ognuno di questi punti è valido un ragionamento analogo a quello fatto nei capoversi 2-3 e si avranno le diverse spese probabili riportate nel diagramma e cioè:

4a) - Spesa

$$\left(1 - \frac{s(3)}{s(2)}\right) 10.000 = \left(1 - \frac{0,93}{0,97}\right) 10.000 = 410$$

5a) - Spesa

$$\left(1 - \frac{s(4)}{s(3)}\right) 10.000 = \left(1 - \frac{0,77}{0,93}\right) 10.000 = 1720$$

6a) - Spesa

$$\left(1 - \frac{s(6)}{s(5)}\right) 10.000 = \left(1 - \frac{0,18}{0,48}\right) 10.000 = 6280$$

Si consideri adesso la verticale passante per 5.

Punto 5-r La spesa è quella afferente al punto 5'-0 e cioè 100 lire che si riportano nel diagramma al punto 5-r.

Punto 5-4 La spesa futura è solo la riparazione $1.000+4.000 = 5.000$ già riportata nel punto 5'-r.

Punto 5-1 { A) Se decido di lavorare e mi sposto al punto 5'-1 la sola spesa è quella della eventuale avaria; essa, tenuto conto della probabilità, è di lire 202 già calcolate per il punto 5'-1.
B) Se decido la sostituzione ho le spese di riparazione. Queste ultime vengono trascurate perchè mantengo, per la scelta della via ottima, solo i costi futuri più bassi.

Punto 5-2 { A L. 410
B " 5.000 che si trascurano

Punto 5-3 { A L. 1.720
B " 5.000 che si trascurano

Punto 5-5 { A L. 6.280
B " 5.000 che si trascurano

Colonna 4'. Riporto nel diagramma i costi afferenti al periodo 4'-5 sommati a quelli dei periodi successivi al 5.

Punto 4'-r costo di riparazione 5.000 + costo futuro L.100 = 5.100.

Punto 4'-0 $[1 - s(1)] \cdot (10.000 + 5.000) + [s(1) \cdot 202] = 350$.

Infatti le alternative che si possono presentare sono casuali e quindi occorre tenere conto delle spese relative moltiplicate ciascuna per le probabilità che loro competono.

Punto 4'-1 $[1 - \frac{s(2)}{s(1)}] \cdot (10.000+5.000) + [\frac{s(2)}{s(1)} \cdot 410] \quad (1) = 705$

Punto 4'-2 $[1 - \frac{s(3)}{s(2)}] \cdot (10.000+5.000) + [\frac{s(3)}{s(2)} \cdot 1.720] = 2.263$

^^^^^^^^^^^^^^^^
(1)- Se $(1 - \frac{s(2)}{s(1)})$ è la probabilità di avaria nel periodo 2, la probabilità di superare il periodo (2) essendo già arrivati al periodo 1 è $\frac{s(2)}{s(1)}$

$$\text{Punto 4' -4} \quad \left[1 - \frac{s(4)}{s(5)} \right] (10.000 + 5.000) + \left[\frac{s(4)}{s(5)} \cdot 5.000 \right] = 8.760$$

Nella colonna 4 invece che comporta una alternativa dipendente dalla decisione dell'ispettore si dovrà riportare la spesa più bassa, così come è stato fatto per la colonna 5.

Punto 4-r		L.	350
Punto 4-a		"	5.100
Punto 4-1	$\left\{ \begin{array}{l} A \\ B \end{array} \right.$	L.	5.100 si trascura
		"	705
Punto 4-2	$\left\{ \begin{array}{l} A \\ B \end{array} \right.$	L.	5.100 si trascura
		"	2.263
Punto 4-4	$\left\{ \begin{array}{l} A \\ B \end{array} \right.$	L.	5.100
		"	8.760 si trascura

Colonna 3'.

Punto 3' -r	$5.000 + 350$	= L.	5.350
Punto 3' - 0.	$(10.000 + 5.100) \cdot 0,01 + 705 \times 0,99$	= L.	849
Punto 3' - 1	$(10.000 + 5.100) \cdot 0,0202 + 2.263 \times 0,9798$	= L.	2.522
Punto 3' - 3	$(10.000 + 5.100) \cdot 0,172 + 5.100 \times 0,828$	= L.	6.220

E' così si prosegue sino a raggiungere il punto 0.

Nell'esempio riportato in figura si potranno così programmare gli interventi:

- I
- { Se alla fine del periodo 1 il pezzo è in avaria e bisogna cambiarlo.
 - { Nessuna decisione da prendere.
 - { Se il pezzo è ancora in efficienza si prosegue il lavoro poichè a questa decisione compete la spesa futura più bassa.
- II
- { Fine periodo 2. Se si è in avaria occorre cambiare l'elemento. Nessuna decisione da prendere.
 - { Fine periodo 2. Se l'elemento è efficiente si prosegue il lavoro poichè a questa decisione compete la spesa di lire 5.760 contro lire 5.849 che si avrebbero in futuro sostituendo l'elemento.

Fine periodo 3 se si è in avaria occorre sostituire.
Nessuna decisione da prendere.

Fine periodo 3. Anche se l'elemento è efficiente occorre sostituirlo poichè la spesa probabile futura relativa alla decisione di mantenere l'elemento in funzionamento è maggiore di quella relativa alla decisione di sostituzione.

Proseguendo con analogo ragionamento si potrà così giungere sino alla fine del lavoro avendo programmato razionalmente il piano di interventi possibili.

CENNI SULLA MANUTENZIONE DI ELEMENTI UGUALI CONTEMPORANEAMENTE IN SERVIZIO

Se lo studio di un elemento semplice è frequente nell'organizzazione di una miniera, non meno importante è il caso di più elementi identici contemporaneamente in servizio, quali per esempio i vagoni di un servizio di trasporto, i rulli di un nastro trasportatore, i riduttori di velocità utilizzati per le varie attrezzature, etc.

Supponiamo quindi che inizialmente siano posti in esercizio N elementi nuovi. Sarà necessario organizzare una politica di manutenzione atta a mantenere tutti gli elementi in esercizio.

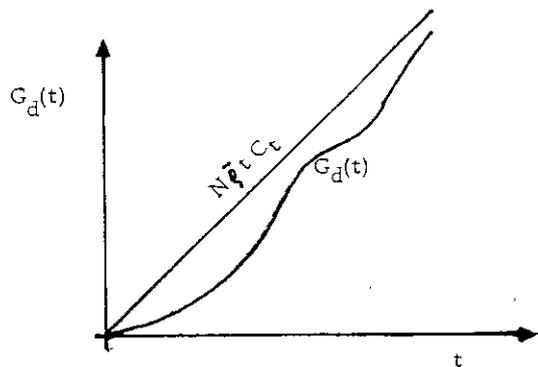
Supponiamo che la curva di sopravvivenza sia conosciuta e, per semplificare, che la avaria avvenga solo alla fine di ogni periodo. Perchè questa ipotesi semplificativa sia accettabile è necessario scegliere periodi brevi.

Si ritiene inoltre per snellire il problema, che le riparazioni o le sostituzioni non comportino perdite di produzione.

Se l'indirizzo scelto è quello della "riparazione" il costo della riparazione di un elemento è uguale a

$$C_d = p + M \bar{d}$$

ove \bar{d} indica il numero di ore necessarie alla riparazione, M il costo orario della mano d'opera e p il costo dell'elemento che si sostituisce.



Riparazione sistematica -

Se l'intervallo tra gli interventi programmati è di periodi Θ , dopo questo tempo si deve provvedere alla sostituzione simultanea di tutti gli elementi che si rinnovano dunque con una frequenza Θ .

Sia C_r il costo della sostituzione di un elemento durante l'intervento programmato e C_d il costo della sostituzione di un elemento che è andato in avaria casualmente nell'intervallo che separa il rinnovamento degli elementi.

Dopo Θ periodi il costo della manutenzione $G_r(t)$ è uguale alla somma degli interventi casuali e di un intervento programmato.

$$G_r(\Theta) = NC_r + \sum_1^{\Theta-1} NC_d p(t)$$

quindi

$$G_r(\Theta) = NC_r + G_d(\Theta - 1) \quad (1)$$

La curva che rappresenta ~~la~~ $G_r(\Theta)$ è spostata rispetto alla $G_d(\Theta)$ di NC_r sulle ordinate e di 1 periodo sulle ascisse.

Le spese medie di manutenzione in un periodo:

$$\frac{G_r(\Theta)}{\Theta} = G_{rm} \quad (2)$$

variano in funzione del numero di periodi che deve essere scelto in modo da avere G_{rm} minimo.

Se Θ è grande cresce nella espressione (1) il termine $G_d(\Theta - 1)$ e nella (2) il numeratore; se Θ è piccolo cresce G_{rm} poichè è piccolo il denominatore della (2).

Il numero di elementi da sostituire alla fine di ogni periodo

$$R(t) = N - \sum_{u=0}^{t-1} R(u) s(t-u)$$

ed espresso in funzione del tasso di sostituzione:

$$R(t) = \rho_t N = N - \sum_{u=0}^{t-1} N \rho_u s(t-u)$$

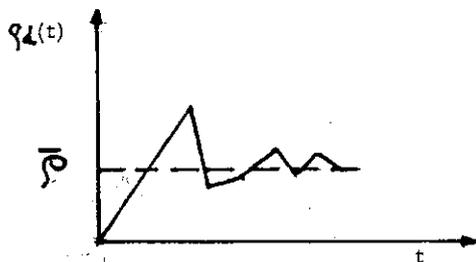
Il limite di $R(t)$ è

$$R = \frac{N}{E} = N \bar{\rho}$$

Il costo di sostituzione dei diversi elementi avariatisi nel periodo t

$$g_d(t) = C_d N \rho(t)$$

Essendo N e C_d costanti l'andamento di $g_d(t)$ è uguale a quello di $\rho(t)$ precedentemente esaminato



Il costo totale delle riparazioni dal periodo 1 sino al periodo t compreso sarà

$$G_d(t) = \sum_1^t g_d(t) = \sum_1^t N C_d \rho(t) = N C_d \sum_1^t \rho(t)$$

che tende al limite

$$N C_d t \bar{\rho}$$

L'andamento della funzione $G_d(t)$ è il seguente

Se θ è grande cresce il valore di $g_d(t)$ (costo di sostituzione degli elementi che si sono avariati nel periodo t^{mo}) poichè con l'aumentare del tempo crescono gli elementi da riparare.

Esisterà dunque un valore di θ che fornisce un valore di G_{rm} intermedio tra $g_d(\theta - 1)$ e $g_d(\theta)$ tale cioè che sia verificata la disuguaglianza

$$NCd \rho(\theta - 1) < \frac{NC_r + \sum_1^{\theta-1} NCd \rho(t)}{\theta} < Cd \rho(\theta)$$

che consente di definire il valore di θ che consenta il minimo di spesa di manutenzione.

INDICE

L'elettificazione delle miniere.....	pag. 1
Generalità.....	" 1
Campo di applicazione della elettificazione in miniera.....	" 4
Tipi di distribuzione di c.c. in sotterraneo.....	" 8
CAF. 1° - Schema di un impianto di distribuzione, di energia elettrica al fondo . I cavi elettrici di miniera.....	
Calcolo dei cavi dal punto di vista caduta di ten- sione.....	" 14 " 20
CAF. 2° - Studio della sicurezza contro il grisù.....	
Norme di costruzione delle apparecchiature di si- curezza. Materiale antideflagrante.....	" 22 " 24
Giunti stagni alla fiamma.....	" 26
Apparecchi con protezione per mezzo di isolanti...	" 28
Apparecchi di sicurezza elettrica.....	" 29
Materiale denominato di sicurezza interna.....	" 31
Materiale protetto dalla ventilazione.....	" 32
CAF. 3° - La protezione delle reti di distribuzione di energia elettrica in miniera.....	
Generalità.....	" 33 " 33
Scelta corretta del cavo dal punto di vista termico..	" 34
Protezione contro i sovraccarichi.....	" 36
Protezione contro i corto circuiti.....	" 42
Lotta contro un incendio di origine elettrica al fondo.	" 48
Appendice:.....	" 50
CAF. 4° - Fenomeni di elettrocuzione.....	
Generalità.....	" 55 " 55
Correnti ohmiche.....	" 56
Correnti capacitive.....	" 61
Circuiti di terra prese di terra.....	" 67

Controllo dell'isolamento di una rete.....	pag. 69
Manutenzione programmata.....	" 72
Introduzione.....	" 72
Generalità.....	" 73
Elaborazione dei dati con l'indagine preliminare.....	" 75
Determinazione del n° di elementi da sostituire dopo ogni periodo.....	" 81
Scelto del tipo di intervento da adottare.....	" 84
Programmazione della manutenzione.....	" 90
Cenni sulla manutenzione di elementi uguali contem- poraneamente in servizio.....	" 96

-----oOo-----