

ELS CABLES ELECTRICS SUBTERRANIS D'ALTA TENSIO

LA tècnica dels cables elèctrics subterranis d'alta tensió ha avançat molt aquests darrers anys i allò que ara és fet correntment per la majoria de fabricants era considerat, no fa gaire, com un inassolible desideratum. En el present article tractarem no més que dels cables per a fortes tensions, més enllà dels 25.000 volts.

La figura 1 representa en secció un cable monofàsic. *C* és la corda de coure; *a*, l'isolant de paper impregnat d'una mescla de valvolina i colofònia, i *P* és el tub de plom.

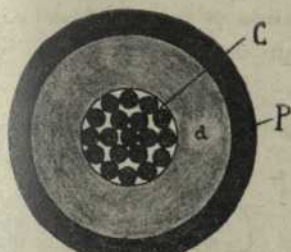


Fig. 1

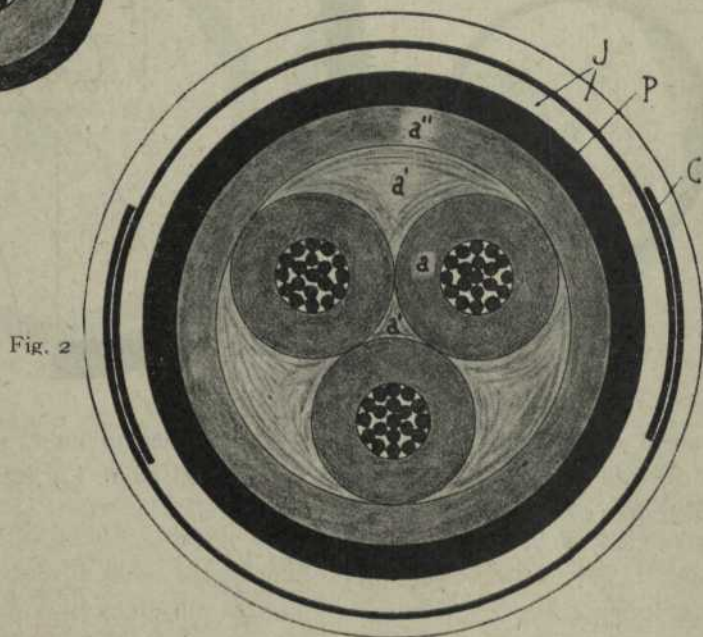


Fig. 2

La figura 2 representa un cable trifàsic. Damunt de cada un dels tres conductors hi ha l'isolant *a*; els tres conductors estan cordats i el buit central, així com els altres tres laterals, són ocupats per uns replens *a'* de paper impregnat, de menys cos que l'emprat en *a* per tal de que s'emmotlli bé

a l'especial forma que té d'adoptar; el conjunt va voltat d'un altre gruix de paper impregnat a'' i després pel tub de plom P . Com a defensa mecànica contra cops, punxades i aixafament hom posa correntment a l'exterior unes capes de jute enquitranat J i dues cintes d'acer C , també enquitranades. Aquesta protecció no pot aplicar-se als cables monofàsics amb corrent altern, degut a què les cintes d'acer s'escalfen molt, per poc important que sigui el corrent que passa pel conductor de coure.

La principal qualitat que ha de posseir el dielèctric, és a dir, el paper impregnat, és que resisteixi bé les fortes tensions que haurà de suportar. Però, a l'ensem, caldrà que no sigui mecànicament rígid, puix tant en fabricar el cable com després en instal·lar-lo sofrirà plegaments i torsions.

* * *

Un cable elèctric és un condensador electrostàtic; si és monofàsic, cas més senzill, el conductor és una armadura i el tub de plom és l'altra. El

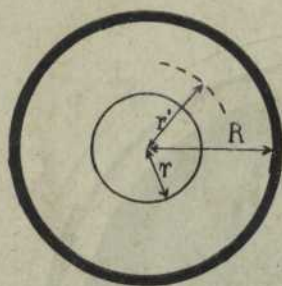


Fig. 3

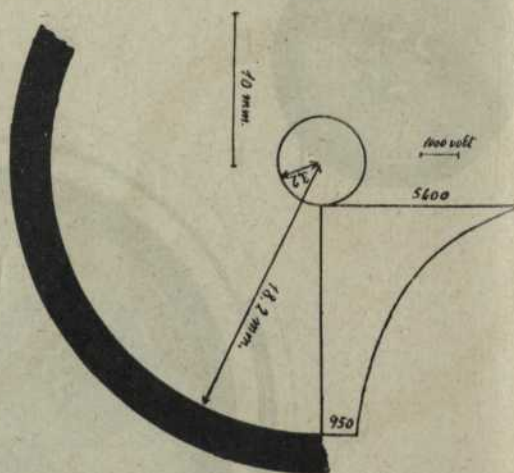


Fig. 4

gradient de potencial no es reparteix uniformement en el dielèctric, sinó que és més fort prop del conductor que no del plom. La següent expressió el determina

$$S = \frac{0'434 V}{R} r' \log. \frac{R}{r}$$

en la que, (fig. 3):

S = gradient de potencial en volt-mm, corresponent al cercle de radi r .

V = tensió aplicada entre el conductor i el plom.

R = radi interior del tub de plom.

r = radi exterior del conductor.

L'aplicació de l'anterior fórmula a un cable monofàsic de 25 mmq de secció de conductor (corda de coure) i amb 15 mm d'espessor isolant, dóna, per a 30.000 volts, els resultats exposats en la figura 4; hom veu que de 950 volt-mm tocant al plom creix el gradient fins a 5400 volt-mm al costat del coure. El gradient fóra

$$\frac{30000 \text{ volt}}{15 \text{ mm}} = 2000 \text{ volt-mm}$$

La repartició del potencial corresponent a aquesta corba de gradient, mostrada en la fig. 5, conté les línies equipotencials (que, naturalment, són circumferències) dibuixades a cada 5000 volts.



Fig. 5

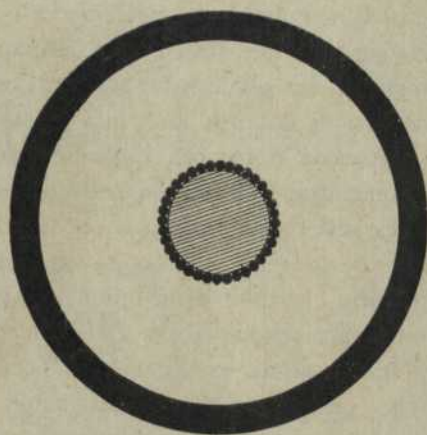


Fig. 6

Un cable de les condicions explicades no fóra d'aconsellar, puix per bé que el gradient mitjà (2000 volt-mm) és perfectament acceptable per a un bon dielèctric de paper impregnat, el gradient màxim (5400 volt-mm) és, potser, excessiu. El defecte resideix en la valor exagerada de la relació entre els radis del tub de plom i del conductor de coure $18'2 : 3'2 = 5'68$. Engruixint, en canvi, el conductor d'aram fent $r = 6$ mm, (correspon a una secció d'uns 85 mmq) i disminuint, encara, quelcom el diàmetre del tub de plom, $R = 18$ mm, hom arriba als següents resultats:

$$\begin{aligned} \text{Gradient màxim, } S &= 4540 \text{ volts} \\ \text{Gradient mig } S &= 2500 \text{ volts} \end{aligned}$$

Aquest cable ja fóra acceptable i, en general, convé no depassar de $R : r = 3$, que és com ha estat establert aquest segon exemple.

La vàlua exagerada de r que resulta d'aquesta regla, fa que moltes vegades la secció del conductor de coure seria excessiva per l'amperatge que té de dur; aleshores, per estalviar coure, el conductor es forma d'una ànima d'una substància qualsevol, jute, paper, plom, filferro, voltada d'una corona de fils de coure (fig. 6) que donin la secció volguda. Per exemple, per a $r = 6$ i 25 mmq caldria posar una ànima de 10'1 mm de diàmetre i al damunt una corona de 36 fils de 0,95 mm de diàmetre.

* * *

Hom parla, de vegades, d'*envelliment prematur* dels cables. Heus ací les causes que en són l'origen. El defectuós contacte entre dos capes successives de paper pot deixar un cert espai que difícilment serà omplert per l'oli o grassa impregnant. Quedarà, doncs, ple de gasos i aquest espai representarà una mena de condensador; atès que el poder dielèctric específic dels gasos és més petit que el del paper impregnat (aire: $\epsilon = 1$; paper impregnat $\epsilon = 3,6$ aproximadament) aquest condensador haurà de suportar una part de la tensió molt més grossa (vindria a ésser quàdruple) de la que li pertocaria si fos ple. Es presenten, aleshores, en aquest espai, fenòmens de ionització, s'hi formen petitíssimes espurnes i comença la carbonització de les seves parets, la qual poc a poc va estenent-se pels voltants i finalment, després de treballar el cable dies o mesos, arriba la perforació del dielèctric i el cable diem que s'ha cremat. Aquesta és una breu i potser no prou exacta explicació de l'envelliment prematur. No hi ha unanimitat entre les autoritats en la matèria per explicar el procés de cremadura dels cables, però és un fet inqüestionable que al seu origen hom troba l'espai o buit deixat entre els papers en mal contacte.

Una causa de producció d'aquests buits, general per a cables trifàsics i monofàsics, és la successió de calentaments i refredaments que té lloc quan una línia treballa quotidianament algunes hores seguides a plena càrrega i després en roman moltes altres amb poca o nul·la càrrega. Així, durant l'escalfament, l'oli d'impregnació del paper isolant es dilata i es desplaça cap al plom, però després, en el refredament, aquest oli és defectuosament reabsorbit pel paper, que esdevé, cada vegada més, eixut d'oli i amb nombrosos petits espais que seran futurs focus de ionitzacions. Si el tub de plom és posat ben ajustat damunt del dielèctric, és a dir, si no hi va balder, semblaria difícil aquest desplaçament de l'oli; però el plom cedeix fàcilment i augmenta de diàmetre quan el cable s'escalfa, i per contra, no es restitueix a ses dimensions primitives en el refredament, amb tot i que al

seu interior es crea un cert buit i que l'atmosfera exerceix exteriorment la seva pressió, la qual no és de prou eficiència i el tub roman dilatat.

* * *

El cable trifàsic del tipus corrent descrit (fig. 2) no pot aplicar-se gaire més enllà dels 30000 volts. Els defectes de contacte entre l'isolant de cada conductor i els replens (a i a' de la fig. 2) són gairebé inevitables i si no existeixen ja al moment de la fabricació es produeixen indefectiblement

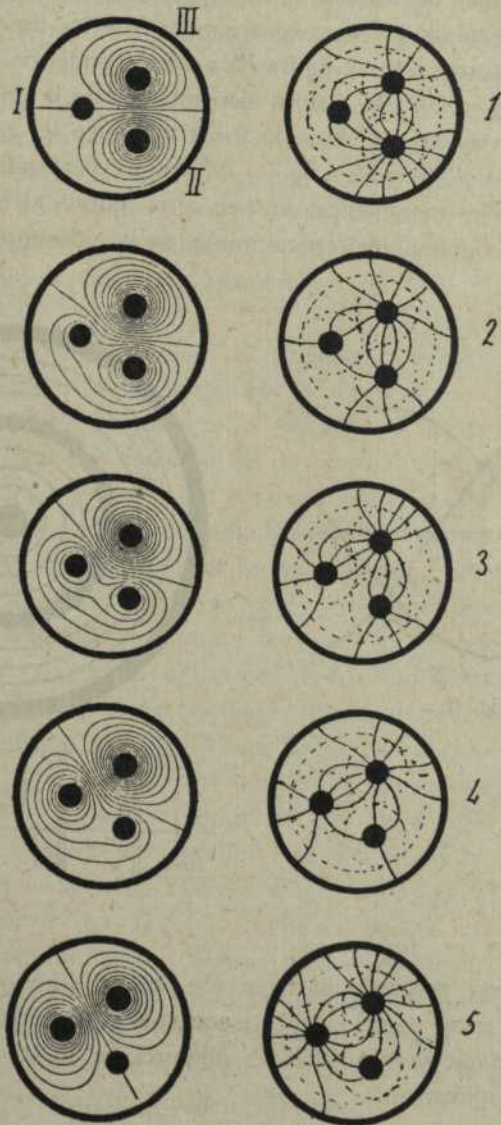


Fig. 7

després, quan el cable s'enrotlla i desenrotlla en les bobines, puix les corbatures i adreçaments que en aquestes maniobres se li donen, determinen un cert escorrimt relatiu de cada conductor respecte als altres i als replens i respecte a l'isolant exterior.

Hom dirà que no seran gaire de témer els defectes de contacte en aquests punts, allunyats com són dels conductors de coure i, per tant, no sotmesos al gradient de potencial màxim, sinó a un gradient tal volta inferior a la seva valor mitjana. Però no és així, puix que les línies equipotencials no són cercles com en el cable monofàsic, ni les línies de força no són radis, sinó corbes de variada forma que es muden a cada període. En la figura 7 hem dibuixat els successius aspectes de les línies equipotencials i de les línies de força, i en la figura 8 la correspondència entre els aspectes escollits 1, 2, 3, 4 i 5 i les valors momentànies de la tensió en les fases I, II i III. Hom veu que les línies de força travessen les zones de contacte dels isolants a , a' i a'' (recordi's fig. 2) no sempre perpendicularment, (com succeeix en els cables monofàsics) sinó en certs indrets al biaix i en aquestes condicions la rigidesa dielèctrica minva molt. Aleshores el corrent de

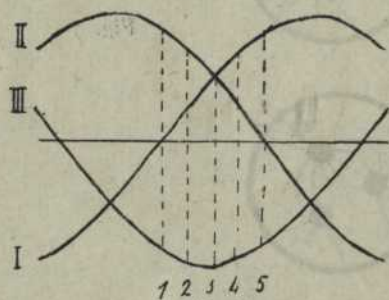


Fig. 8

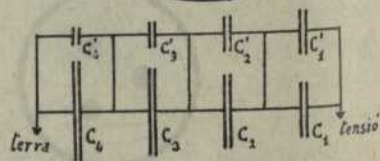
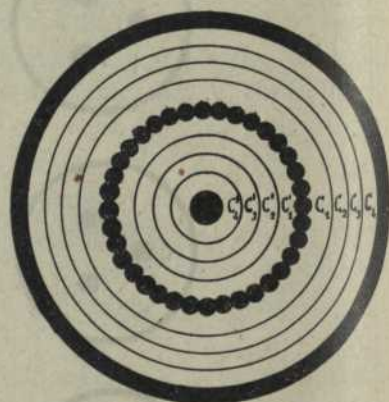


Fig. 9

pèrdua no travessa perpendicularment els papers, sinó que, en certa manera, va lliscant entre paper i paper i aquestes fugues de corrent, que són anomenades *pèrdues en el dielèctric*, adquireixen molta importància i el cable envelleix ràpidament.

En conseqüència, més enllà dels 30000 als 40000 volts el cable trifàsic no pot emprar-se, si no és amb modificacions que, com més endavant expliquem, el converteixen en tres cables monofàsics ajuntats.

* * *

El desigual repartiment del potencial que dona un elevat gradient a la vora del conductor es pot remeiar emprant diverses substàncies isolants que tinguin poders dielèctrics específics decreixents a comptar del core al plom. Per exemple: aplicant tres substàncies de poder dielèctric específic respectiu de 4, 3 i 2 la repartició del potencial és molt més bona que en un cable de les mateixes dimensions, però de dielèctric uniforme. Però aquest sistema, proposat ja fa anys per l'enginyer JONA i conegut amb el nom de *dielèctric graduat*, no ha reeixit en la pràctica, puix que no s'ave amb l'ús de l'isolant de paper impregnat com a dielèctric exclusiu, que és el millor i el més econòmic, sinó que necessita un dielèctric mixt, de goma i paper, per exemple; i, altrament de què substàncies tan diverses no lliguen bé, hi haurien dificultats insuperables per a la bona fabricació d'aixtal cable.

Una altra solució per igualar el gradient, molt enginyosa però excessivament complicada, és la proposada recentment per l'enginyer SILBERMANN. La construcció del cable és la següent. Al centre (fig. 9) hi ha una ànima metàl·lica, que pot ésser de fils de ferro i, al seu voltant, l'isolant de paper impregnat, però dividit per ecrans tubulars metàl·lics formats per tires perforades de fi paper d'alumini. Després ve el conductor de coure (corona de fils), que és el que du el corrent elèctric; sobre d'aquest conductor s'ha aplicat un altre isolant de paper impregnat, dividit també per un mateix nombre d'ecrans metàl·lics, i finalment a l'exterior el tub de plom. Hom veu que el cable està format per dues sèries de condensadors de capacitat creixent desde l'ànima al plom. En un extrem del cable les intercalacions metàl·liques s'acoblen tal com la figura indica, de manera que l'ànima farà terra junt amb el tub de plom i els condensadors C_4 i C'_4 estaran en paral·lel, a l'igual que els altres, de dos en dos. Fent per manera que la capacitat de totes les parelles vingui a ésser la mateixa, cosa ben factible, puix les capacitats internes C'_4 , C'_3 , C'_2 , C'_1 creixents completament a les externes C_4 , C_3 , C_2 , C_1 decreixents, el gradient de potencial resulta sensiblement uniforme. Segons afirma l'inventor, aquest cable resulta més econòmic, per a alts voltatges i fortes seccions de conductor, que els cables monofàsics sense intercalacions metàl·liques. No hi ha però encara prou experiència per esvair el recel que suscita la presència de l'ànima central i de les intercalacions metàl·liques.

* * *

Renunciant a voler igualar el gradient de potencial, cal, per fer front a la seva valor prop del coure, emprar allí un excellent dielèctric, cosa que s'aconsegueix fent-lo amb paper poc porós. Però un paper així, aplicat com a únic dielèctric no permetria la bona impregnació del cable, per la qual raó el dielèctric es forma per capes successives de papers de porositats creixents i, d'aquesta manera, amb tot i que les qualitats elèctriques del cable no minven, la bona impregnació del paper fins al conductor és fàcil.

Cal, també, per assegurar una llarga vida al cable, pensar en el fenomen, ja explicat, del desplaçament de l'oli i consegüent formació de petits espais buits prop del coure. La millor solució per evitar-ho ha estat proposada per l'enginyer EMMANUELI i consisteix a mantenir permanentment una certa pressió d'oli en el cable, la qual cosa s'aconsegueix fent tubular el conductor de coure; aquest és format (fig. 10) amb un filferro en-

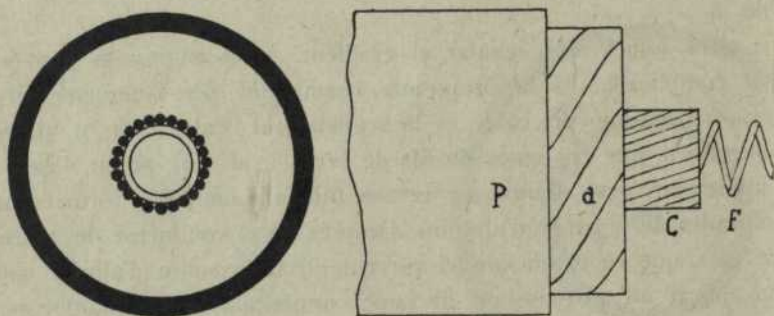


Fig. 10

rotllat en hèlix discontinua i una corona de fils de coure al damunt. Un cop instal·lat el cable, es posen en les caixes d'unió uns recipients plens d'oli en comunicació amb el buit del conductor. Les dilatacions i contraccions de l'oli del cable es tradueixen en variacions de nivell en aquells recipients. La forma tubular del conductor ajuda molt, durant la fabricació, a assecar i impregnar satisfactòriament el paper.

A l'efecte d'evitar l'engrandiment del tub de plom *P* es poden enrotllar al seu damunt unes tires de llautó, aplicades directament, és, sense coixí intermig. L'armadura de cintes d'acer no és possible per ésser el cable monofàsic. D'aquest tipus de cable ja n'hi ha algunes línies que funcionen satisfactòriament i actualment Pirelli de Milan en construeix algunes desenes de kilòmetres destinades a Nova York.

L'augment de diàmetre del conductor, obligat per la seva disposició tubular, no representa augment del diàmetre total del cable, puix ja hem dit que per tal de no depassar la relació $R : r = 3$, cal gairebé sempre cablejar els fils de coure damunt d'una ànima de jute, filferros, etc. És clar que per a un cable destinat a conduir molts milers de kilovats, el conductor que caldrà ja serà de prou diàmetre i no caldria engroixir-lo; però, aleshores, pel fet de tractar-se de corrent altern, comença a adquirir importància l'anomenat *skin effect* i la resistència aparent del conductor si hom en treu els fils centrals gairebé no augmenta. Per a una freqüència de 50 períodes, que és la normal, el *skin effect* ja desaconsella, més enllà dels 200 mm, el conductor ple.

* * *

Els cables monofàsics tenen tots un greu inconvenient sota el punt de vista mecànic i és que no s'els pot aplicar l'armadura de cintes d'acer, puix el corrent que s'indueix i el magnetisme de l'acer signifiquen, com al començament hem dit, un fort escalfament del cable i una sensible pèrdua d'energia. Quan es tracta de cables instal·lats directament a terra, sense protecció de canal de ciment, tub de cartró pedra, etc., la protecció de les cintes d'acer esdevé indispensable i el cable monofàsic no es pot emprar.

En el cable trifàsic proposat per HÖCHSTADTER i conegut per *cable H* o de *superfícies equipotencials*, l'isolant de cada un dels tres conductors està cobert per una fina capa metàl·lica, com la de les intercalacions metàl·liques del cable SILBERMANN. Aquestes tres capes, que estan naturalment en contacte, representen el neutre del cable i cada un dels conductors de coure constitueix, vertaderament, un cable monofàsic amb un voltatge igual a $E : \sqrt{3}$, essent E la tensió composta. Si es tracta d'una instal·lació amb el neutre a terra, es posa directament damunt de les capes metàl·liques el tub de plom; però si el neutre és isolat, cal posar un altre gruix d'isolant entremig.

La presència dintre del cable d'aquelles tènues capes metàl·liques significa, indubtablement, un perill, i d'altra banda, l'assecament i impregnació es compliquen encara més; aquesta complicació afecta, en termes generals, la fabricació tota del cable. S'ha proposat, doncs, un altre expedient més senzill per fer de tres cables monofàsics un de trifàsic. Els tres cables monofàsics, del tipus corrent o del tipus EMANUELI, es cablejen junt amb els corresponents replens i al damunt es posa la protecció clàssica de cintes d'acer i jute enquitranat.

Una remarca cal fer, però, en defensa dels cables monofàsics. I és que, en el cas de tenir una sola línia en servei, si hom es vol prevenir contra possibles avaries, s'haurà d'instal·lar, si el cable és trifàsic, un altre d'igual,

la qual cosa vol dir doblar la despesa. En canvi, en els cables monofàsics, instal·lant-ne quatre—és a dir, tres en servei i un de reserva—s'assoleix una seguretat semblant sols amb un escreix de despeses del 33 per cent.

JOAN ROSICH