

eman ta zabal zazu



Universidad
del País Vasco

Euskal Herriko
Unibertsitatea

Goi-Tentsioko Lineak eta Kableak

ISBN: 978-84-9860-668-3

Agurtzane Etxegarai Madina
Zigor Larrabe Uribe

**EUSKARA ETA ELEANIZTASUNeko
ERREKTOREORDETZAREN SARE ARGITALPENA**

Liburu honek UPV/EHUko Euskara eta Eleaniztasuneko Errektoreordetzaren
dirulaguntza jaso du

GOI-TENTSIOKO LINEAK ETA KABLEAK



ZIGOR LARRABE URIBE

AGURTZANE ETXEGARAI MADINA

AURKIBIDEA

GOI-TENTSIOKO AIREKO LINEAK	8
1 SARRERA	8
2 PARAMETRO ELEKTRIKOAK	10
2.1 Luzetarako parametro elektrikoak	10
2.1.1 Erresistentzia R [Ω]	10
2.1.2 Induktantzia L [H]	12
2.2 Zeharkako parametro elektrikoak	14
2.2.1 Kapazitatea C [F]	14
2.2.2 Konduktantzia G (S)	15
3 ERREGIMEN IRAUNKORREKO FUNTZIONAMENDUA	19
3.1 Sarrera	19
3.2 Garraio-lineen zirkuitu baliokideak	19
3.2.1 Linea laburrak	21
3.2.1.1 Erregulazioa	22
3.2.1.2 Linea laburren tentsioaren erregulazioaren ebazpen analitikoa, mutur hartzaileko baldintzak jakinak direnean	23
3.2.1.3 Linea laburren tentsioaren erregulazioaren ebazpen analitikoa, mutur igorleko baldintzak jakinak direnean	25
3.2.1.4 Baldintza mistodun kasuen analisia	26
3.2.1.5 Linea laburretako galera erresistiboak	26
3.2.2 Linea ertainak	27
3.2.2.1 π ereduak	27
3.2.3 Linea luzeak	29
3.2.3.1 Kargan dagoen garraio-linea baten diagrama	29
3.2.3.2 Galerarik gabeko linea baten kasua	32
3.2.3.3 Ekuazio diferentzialen ebazpena	32
3.2.3.4 Hedapen konstantea eta inpedantzia adierazgarria	33
3.2.3.5 Linea luzeen ekuazioak era hiperbolikoan	35
3.2.3.6 Linea luzeen konstante orokortuak	36
3.2.3.7 Linea luzeen ekuazioa denbora-eremuan seinale harmonikoekin	36
3.2.3.8 Fase-abiadura	38
3.2.3.9 Uhin-luzera edo espazio-periodoa	39

3.2.3.10	Potentzia naturala edo SIL (<i>surge impedance loading</i>)	40
3.2.3.11	Luzera kritikoa	42
3.2.3.12	Linea luzeen T eta Π eredu baliokideak	42
3.2.3.13	Linea luzeen eredu baliokide hurbilduak	44
4	ANPAZITATEAREN KALKULUA	46
4.1	Sarrera	46
4.2	Goi Tentsioko Lineen Arautegiak dioena	47
4.2.1	Intentsitate-dentsitatea erabiliz	47
4.2.2	Intentsitate maximo onargarriak	48
4.2.3	Oharrak	48
4.3	REEn Operazio Prozedurek diotena	48
4.4	IEEE eta CIGRE erakundeek diotena	49
4.4.1	IEEE Std 738-2006	50
4.4.2	CIGRE TB 299	51
	GOI-TENTSIOKO LUR AZPIKO LINEAK	54
1	SARRERA	54
2	PARAMETRO ELEKTRIKOAK	54
2.1	Luzetarako parametro elektrikoak	54
2.1.1	Erresistentzia R [Ω]	54
2.1.2	Induktantzia L [H]	54
2.2	Zeharkako parametro elektrikoak	54
2.2.1	Kapazitatea C [F]	54
2.2.2	Konduktantzia G (S)	55
3	ANPAZITATEA	56
3.1	Intentsitate maximo onargarriak	56
1.	taula. Kobrezko eroaledun kable polobakarrak	57
2.	taula. Aluminioko eroaledun kable polobakarrak	57
3.	taula. Kobrezko eroaledun kable polobakar armatuak	58
4.	taula. Aluminioko eroaledun kable polobakar armatuak	58
5.	taula. Kobrezko eroaledun hiru poloko kableak	59
6.	taula. Aluminioko eroaledun hiru poloko kableak	59

7. taula. Kobrezko eroaledun hiru poloko kable armatuak	60
8. taula. Aluminioko eroaledun hiru poloko kable armatuak	60
3.2 Zuzenketa-faktoreak	61
3.2.1 Lur azpiko instalazioak	61
3.2.1.1 Lurzoruko tenperatura 25 °C-koa ez denean (ITC-LAT-06)	61
3.2.1.2 Lurzoruaren erresistibitate termikoa 1,5 K·m/W ez denean (ITC-LAT-06)	61
3.2.1.3 Lurzoruan bildutako hiru poloko kableak edo kable polobakar hirukoteak (ITC-LAT-06)	62
3.2.1.4 Lurperatze-sakonera	62
3.2.2 Aireko instalazioa	63
3.2.2.1 40 °C giro-tenperatura ez duten inguruneak (ITC-LAT-06)	63
3.2.2.2 Galeriatan instalatutako kableak (ITC-LAT-06)	63
3.2.2.3 Airean instalaturiko hiru poloko kable edo kable polobakar hirukote multzoak (ITC-LAT-06 y UNE 211435)	63
3.2.2.4 Zuzenean eguzkipean dauden kableak	66
3.3 Zirkuitulabur-intentsitate maximo onargarriak	66
BIBLIOGRAFIA	68

GOI-TENTSIOKO AIREKO LINEAK

1 SARRERA

Elektrizitatean erabiltzen den material nagusia kobrea da. Material harikorra, oso eroale ona eta erabilgarria da. Hain erabilia izan denez, haren prezioa handituz joan da, eta, horregatik, ordezeko materialen erabilera bultzatu da.

Kobrea ordezkatzeko aluminioa erabili da. Kobreak baino erresistibitate handiagoa izan arren, eroale ona da, pisu gutxiago du, eta haren prezioa askoz txikiagoa da. Kobreakin alderatuz, ezaugarri hauek ditu:

- Erresistentzia elektriko jakin baterako behar den aluminio-azalera handiagoa da, eroale txarragoa delako.
- Nahiz eta sekzioa handiagoa izan, kobreakin pisuaren erdia du. Ezaugarri hori abantaila handia da, bai garraiatzeko bai aireko lineen euskarrien gainean jartzeko.
- Nahiz eta erresistentzia elektriko jakin baterako behar den aluminioaren sekzioa kobreakin baino handiagoa izan, kobrea baino merkeagoa da.

Dena dela, aluminioaren trakzioaren aurkako erresistentzia oso txikia denez, ezin da aireko lineetan eroale gisa erabili. Eragozpen horri aurre egiteko, aluminioa beste material batekin konbinatzea aztertu zen, eta horrela ACSR (*Alluminium Conductor Steel Reinforced*) motako eroaleak sortu ziren, altzairuzko gunedun aluminiozko eroaleak. Altzairuzko gunek trakzio-indarrak jasango ditu, eta kanpoaldeko aluminiozko hariak intentsitatea garraiatuko dute. Konbinazio hori kobreakin alderatuz:

- Erresistentzia elektriko jakin baterako, ACSR eroalearen azalera kobreakin baino handiagoa izaten jarraitzen du.
- Nahiz eta sekzioa handiagoa izan, ACSR eroalearen pisua kobreakin pisuaren heren bat txikiagoa da. Ezaugarri hori abantaila handia da, bai hura garraiatzeko bai aireko lineen euskarrien gainean jartzeko.
- Nahiz eta erresistentzia elektriko jakin baterako behar den ACSR eroalearen sekzioa kobreakin baino handiagoa izan, kobrea baino merkeagoa da.
- Trakzio-indarrak altzairuzko gunek jasango ditu, eta aluminioa korrante elektrikoa garraiatzeko erabiliko da soilik.

Gaur egun, ACSR motako eroaleez gainera, beste material konbinazio batzuk erabiltzen dira aireko lineetan, baina ACSR motako eroaleek jarraitzen dute goi-tentsioko aireko lineetan eroale motarik erabilienera izaten.

2 PARAMETRO ELEKTRIKOAK

Zirkuitu elektriko orok elementu hauek ditu osagai: erresistentzia, induktantzia, kapazitatea eta konduktantzia. Elementu horiekin sortzen dira egungo sistema elektriko guztiak, zirkuitu sinpleenetik hasita energia-sistema konplexueneraino.

Aurreko elementu elektrikoaren sailkapen bat egin daiteke, sistema elektrikoan duten eraginaren arabera. Sailkapen honetan, parametroa definitzeko erabiltzen den letra eta unitatea adierazten dira:

- Luzetarako parametroak:
 - Erresistentzia R [Ohm, Ω]
 - Induktantzia L [Henry, H]
- Zeharkako parametroak:
 - Kapazitatea C [Faraday, F]
 - Konduktantzia G [Siemens, S]

Aurreko parametroekin lan egiteko, magnitude hauek erabiltzen dira:

$$\underline{Z} = R + j \cdot X \quad \text{Inpedantzia} \quad [\Omega]$$

$$\underline{Y} = G + j \cdot B \quad \text{Admitantzia} \quad [S]$$

$$X_L = L \cdot \omega = L \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \quad \text{Erreaktantzia induktiboa} \quad [\Omega]$$

$$B = C \cdot \omega = C \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \quad \text{Suszeptantzia} \quad [S]$$

2.1 Luzetarako parametro elektrikoak

Erresistentzia eta induktantzia dira linearen luzeran zehar eragin handiena daukaten parametro elektrikoak. Nahiz eta inpedantzia gisa bildu, haien izaera elektrikoa guztiz ezberdina da; harilek sortzen duten efektu induktiboak energia elektrikoa metatzea ahalbidetzen du, eremu magnetiko moduan; erresistentziaren eragina Joule efektuaren ondorioz sortzen diren galerak dira.

2.1.1 Erresistentzia R [Ω]

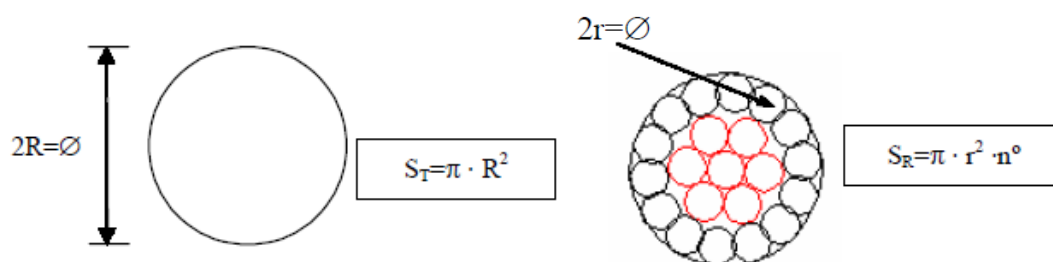
Erresistentzia da edozein materialek korrante elektrikoa iragaiteari agertzen dion aurkaritza. Kontzeptualki, elementu eroale baten erresistentzia bere dimentsio fisikoaren eta erresistibitatearen menpe dago; adierazpen honetan ikus daiteke:

$$R = \rho \cdot \frac{L}{S}$$

Non:

R [Ω]	Korronte zuzeneko erresistenzia elektrikoa 20 °C-tan.
ρ [$\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$]	Erresistibitatea (materialak korronte elektrikoaren zirkulazioari aurka egiten dion magnitudea da, azalera eta luzera unitateko).
L [m]	Luzera
S [mm^2]	Azalera

Luzerari eta azalerari dagokienez, eroaleak haril multzoz osatuak egoten dira, eta, haril horiek elkarren artean helikoidalki txirikordatuak daudenez, eroale baten luzera eroalea osatzen duten harilen luzera baino % 2 inguru txikiagoa izango da, eta eroalearen sekzio erreala neur daitekeen sekzioa baino % 1 edo % 2 txikiagoa izango da, harilen artean airea egongo baita. Irudi honetan, sekzio osoaren eta errealaren arteko ezberdintasuna adierazten da:



Bestalde, material baten erresistibitatea tenperaturaren menpe dagoen balio bat da, adierazpen honetan ikus daitekeen bezala:

$$\rho_T = \rho_{20^{\circ}\text{C}} \cdot [1 + \alpha \cdot (T - 20^{\circ}\text{C})]$$

Non:

T [°C]	Kalkulatu nahi den tenperatura.
$\rho_{20^{\circ}\text{C}}$ [$\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$]	Erresistibitatea 20 °C-tan (tauletan agertzen dena).
$\alpha_{20^{\circ}\text{C}}$ [°C ⁻¹]	Materialaren tenperatura-koefizientea 20 °C-tan (tauletan).

Fabrikatzaileek Ω/km -ko unitateetan ematen dituzte eroaleei buruzko erresistentzia-balioak, eta kontuan izaten dituzte sekzioari eta luzerari dagozkien efektuak, 20 °C-ko tenperaturarako eta korronte zuzenerako.

Eroalea korronte zuzen batek zeharkatu beharrean korronte alterno batek zeharkatzen duenean, eroalearen erresistentzian eragina duten efektuok sortuko ditu korronte alternoak:

- **Skin efektua.** Eroalearen azalera, intentsitate-dentsitatea ez da uniformeki banatzen; intentsitate gehiena kanpoaldetik joango da, eta efektu hori maiztasunarekin handitzen da. ACSR motako eroaleetan eta 50-60 Hz-eko

maiztasunetan, Skin efektuak eroalearen erresistentzia % 1-10 handituko du, eroaleen diametroak 20 mm eta 50 mm artean daudenean, hurrenez hurren.

- **Nukleoko galerak.** Korrante alternoaren zirkulazioak fluxu magnetikoa sortzen du eroalearen altzairuzko gunearen ardatzaren noranzkoan; fluxu magnetiko horrek eroalearen tenperatura handituko du, eta, ondorioz, baita korrante zuzeneko erresistentzia ere.
- **Transformadore-efektua.** Altzairuzko guneko fluxu magnetikoak intentsitateak induzituko ditu aluminiozko hariletan eta, horren eraginez, aldatu egingo da aluminiozko haril-geruzen arteko intentsitate-dentsitatea.

Hiru aluminiozko haril-geruzadun ACSR motako eroaleetan, aurreko bi efektuek korrante alternoko erresistentzia % 5-20 artean handitzea dakar.

ACSR motako eroaleen erresistentziaren azterketa sakona egin da bibliografiako [1] erreferentzian.

Beraz, kalkuluak egiteko orduan, eroale baten erresistentziaren datua erabiltzeko, komenigarria izango da jakitea eroaleak zer tenperaturatan lan egingo duen eta korrante alternoak zer efektu sortuko dituen ere. Ildo horretatik, Europa mailako fabrikatzaileen tauletan, 20 °C-ko eta korrante zuzeneko erresistentziaren balioak bakarrik agertzen dira, araudiek horretara bakarrik behartzen dituztelako; baina AEBko fabrikatzaileen kasuan, datu hori emateaz gainera, korrante alternoko erresistentziaren balioak ere ematen dituzte, 50 °C eta 75 °C-tan. Azpimarratu beharrekoa da Estatuan aplikagarria den araudian [2], 85 °C-rainoko lan-tenperaturak finkatzen direla aireko lineetako eroaleetarako.

2.1.2 Induktantzia L [H]

Eroale batetik igarotzen den intentsitateak eremu magnetiko bat sortzen du; intentsitatea denborarekin aldakorra bada, eremu magnetikoa ere aldakorra izango da. Eremu magnetiko horrek fluxu aldakor bat sortuko du, eta fluxu horrek eroalea eta haren inguruan dauden elementuak besarkatuko ditu; ondorioz, indar elektroeragilea sortuko du eroalean (autoindukzioa) eta inguruko elementuetan (indukzioa). Kontzeptu hori Faraday-k aurkitu eta aztertu zuen 1831n.

Induktantziaren ezaugarri garrantzitsu bat zera da: haren efektua korrante alternoa dagoenean bakarrik izan behar dela kontuan. Kalkuluak egiteko, induktantzia erabili beharrean, erreaktantzia inductiboa erabiliko da, eta horrela:

$$X_L[\Omega] = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_n \cdot L \Rightarrow \begin{cases} \text{(Korrante zuzenean: } \underline{Z} = R \\ \text{(Korrante alternon: } \underline{Z} = R + j \cdot X \end{cases}$$

Aurreko adierazpena azterturik, ondoriozta daiteke elektroien zirkulazioari aurkaritza handiagoa egiten zaiola korrante alternoan korrante zuzenean baino.

Ondoren, aireko lineetan erabiltzen diren inдукtantiaren kalkulurako adierazpenak laburbilduko ditugu, adierazpen horietan egindako hipotesiak azpimarratuz. Adierazpenak nola lortzen diren jakiteko, erreferentzia ugari daude [].

Luzera infinitudun zilindro zurrun eta homogeneo baten inдукtancia ematen du adierazpen honek:

$$L_k \left[\frac{H}{km} \right] = \frac{\mu}{2 \cdot \pi} \cdot \left[\frac{1}{4} + \ln \frac{D}{r} \right] = \frac{\mu}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \frac{D}{e^{-\frac{1}{4}} \cdot r} = \frac{\mu}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \frac{D}{GMR_{eroale}}$$

Non:

$\mu = \mu_0 \mu_r$	Materialaren iragazkortasun magnetikoa
$\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-4}$ [H/km]	Hutsaren iragazkortasun magnetikoa
μ_r	Iragazkortasun erlatiboa
	Cu, Al eta aleazioen kasuan, $\mu_r = 1$
$GMR_{eroale} = e^{-1/4} \cdot r$ [m]	Batez besteko erradio geometrikoa
R [m]	Eroalearen erradioa
D [m]	Eroalearen azaleratik D distantziara dagoen edozein puntu.

Fase bakoitzeko eroale bakarra eta berdina duten eta lur eroalerik ez duten linea trifasiko orekatuen kasuan, aurreko adierazpenetik honetara igarotzen da:

$$L_k \left[\frac{H}{km} \right] = \frac{\mu_0}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \frac{GMD}{GMR_{eroale}}$$

Non:

GMD [m]	Faseen eroaleen arteko distantzien batez besteko geometrikoa:
---------	---

$$GMD = \sqrt[3]{D_{ab} \cdot D_{ac} \cdot D_{bc}}$$

Gehienetan, fase bakoitzeko eroale bakarra izan beharrean, bi, hiru edo lau eroale sorta daudenean, aurreko adierazpen orokorra ere aplikagarria izango da, aldaketa hauek eginda:

$$L_k \left[\frac{H}{km} \right] = 2 \cdot 10^{-4} \cdot \ln \frac{GMD}{GMR_{sorta}}$$

Non:

$$GMR_{sorta} = \begin{cases} GMR_{eroale} & \text{Simplex} \\ \sqrt{GMR_{eroale} \cdot \Delta} & \text{Duplex} \\ \sqrt[3]{GMR_{eroale} \cdot \Delta^2} & \text{Triplex} \\ \sqrt[4]{GMR_{eroale} \cdot \Delta^3 \cdot \sqrt{2}} & \text{Kuadruplex} \end{cases}$$

Δ [m] sortako eroaleen arteko distantzia (simetrikoak direnean)

Lur eroalea daramaten lineen kasuan, aurreko adierazpenak ezin dira aplikatu, eta adierazpen orokorrago batzuk aplikatu beharko dira: Carson-en ekuazioak.

2.2 Zeharkako parametro elektrikoak

2.2.1 Kapazitatea C [F]

Linea elektriko bat osatzen duten eroaleen arteko potentzial-diferentziak direla medio eroaleak kargatuko dira, kondentsadoreetan gertatzen den bezala. Efektu hori txikia eta baztergarria izaten da linea laburretan, baina, luzera handitzen den heinean, haren eragina adierazgarria da. Kapazitateak linearen tentsio-erorketan, eraginkortasunean, potentzia-faktorean eta egonkortasunean izango du eragina.

Kapazitatearen analisiaren oinarria Gauss-en legea da: azalera itxi baten barneko karga elektrikoak azalera horretatik irteten edo sartzen den fluxu elektrikoaren berdina da.

Aireko linea trifasiko orekatuentzat, berriro ere lur eroaleak kontuan izan gabe, adierazpen hau erabiliko dugu:

$$C_k \left[\frac{F}{km} \right] = \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon}{\ln \frac{GMD}{GMR_C}}$$

Non:

$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$	Materialaren permitibitate elektrikoak $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-9}$ [F/km] Hutsaren permitibitate elektrikoak ϵ_r Permitibitate erlatiboa, airean $\epsilon_r = 1$
GMR_C [m]	Batez besteko erradio geometrikoa, baina kapazitaterako, $GMR_{eroale} = r_{eroale}$
GMD [m]	Faseen eroaleen arteko distantzien batezbesteko geometrikoa.

Aurreko adierazpenetik abiatuta, lineekin kalkuluak egiteko kapazitatea suszeptantziaren barruan erabiliko da, eta azken hori admitantziaren barnean, beraz:

$$B_k \left[\frac{S}{km} \right] = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_k$$

2.2.2 Konduktantzia G (S)

Konduktantzia da material batek korrante elektrikoaren zirkulazioa errazteko duen propietatea; hots, erresistentziaren alderantzizkoa da. Konduktantzia adierazteko aukeretako bat hau da:

$$G_k \text{ (faseko)} \left[\frac{S}{km} \right] = \frac{P_{fase/km} [kW]}{V_{fase}^2 [kV^2]} \cdot 10^{-3} \Rightarrow G_{Totala} [S] = G_k \text{ (faseko)} \cdot L [km] \cdot Fase_kop$$

Konduktantziak kontuan hartzen ditu aireko lineen eroaleak sostengatzen dituzten isolagailuetan gertatzen diren ihes-korranteak eta airean zehar gertatzen diren galerak. Faktore ugariaren menpe dago, horien artean ingurumena eta klima; aurreikusteko zailak dira eta, gainera, linean zehar alda daitezke.

Konduktantziak balio oso txikiak izaten ditu aurreko parametroekin alderatuta, eta, horregatik, gehienetan baztertu egiten da kalkuluetan.

Isolagailuen efektua

Baldintza normaletan, elektroiek airean zehar 1 cm-ko distantziak zeharkatu ditzakete 10 kV-eko; beraz, zenbat eta linearen tentsioa handiagoa izan, orduan eta isolagailuen luzera handiagoak erabili beharko dira.

Ez dagoenez isolagailu perfekturik, beti zirkulatuko dute elektroi gutxi batzuk isolagailuaren azaleratik eta, batzuetan, baita isolagailuen barnetik ere. Hori dela eta, beti egongo dira galera batzuk isolagailuetan.

Galera horien ohiko balioak hauek izaten dira disko itxurako isolagailu bakoitzean (kate-isolagailuetan disko bat baino gehiago erabiliko dira):

- **Giro lehorrean:** 3 W eta 5 W artean.
- **Giro hezean:** 8 W eta 20 W artean.

Aurreko balioetatik abiatuta, isolagailuek sorturiko guztizko galerak kalkula daitezke:

$$P_T [kW] = P_{isolagailu} \cdot Isolagailu_kopurua$$

Koraa-efektua

Baldintza jakin batzuetan, aireko linea baten eroale batetik doazen elektroi batzuek eroaletik airerantz ihes egiteko beste energia lor dezakete. Hori gertatzen bada, izpi argitsu bat sortzen da eroaleen inguruan. Argi horren koloreak efektuaren garrantzia jakiteko balio du: kolorea gorrixka denean, efektua ez da oso garrantzitsua izango, baina urdina denean, bai.

Efektu hori aztertu zuen lehenetarikoa Peek izan zen, XX. mende hasieran, eta koroa-efektua kalkulatzeko formula esperimentalak lortu zituen. Peekek jarraitutako metodoa ulertzeko, hiru tentsiook definitu behar dira:

- **Txinpartazko tentsio kritikoa (U_c).** Elektroiek gainditu behar duten airearen tentsioa edo erresistentzia, eroalea uzteko.
- **Ikusmen-tentsio kritikoa.** Efektua ikusgaia izateko, elektroiek gainditu behar duten airearen tentsioa edo erresistentzia. Txinpartazko tentsio kritikoa baino handiagoa da.
- **Linearen tentsio altuena (U_m).** Baldintza normaletan, kargen aldakortasunaren ondorioz lineak har dezakeen tentsioaren baliorik altuena da. Konpainia elektrikoaren datua izaten da, edo bestela, araudietan agertzen dira balio horren datuak.

Peekek metodo honi jarraitu zion:

- Airearen txinpartazko tentsio kritikoa kalkulatu, baldintza lehor eta hezeetan.
- Linearen tentsio altuena kalkulatu.
- Aurreko bi tentsioak alderatu. Txinpartazko tentsio kritikoa linearen tentsio altuena baino handiagoa bada, elektroiek ez dute izango airerantz ihes egiteko energia nahikorik eta ez da koroa-efekturik sortuko; baina txinpartazko tentsio kritikoa linearen tentsio altuena baino txikiagoa bada, orduan koroa-efektua sortuko da eta galerak kalkulatu beharko dira.

Txinpartazko tentsio kritikoa kalkulatu adierazpen honekin egiten da:

$$U_c [kV] = 84 \left[\frac{kV}{cm} \right] \cdot m_c \cdot m_t \cdot r_{eroale} [cm] \cdot \delta \cdot \log \frac{GMD}{r_{eroale}}$$

Non:

m_c Erabilitako eroalearen koefizientea. Balioak:
 1 eroale berrientzat
 0,93tik 0,98ra eroale zaharrentzat
 0,83tik 0,87ra hariz osaturiko kableentzat

m_t Ingurumen-koefizientea. Balioak:
 1 lehorra
 0,8 hezea edo kutsatua

δ_c Airearen dentsitate erlatiboa:

$$\delta = \frac{3,921}{273 + \theta [^{\circ}C]} \cdot h \quad \log h = \log 76 - \frac{y [m]}{18336}$$

$y [m]$ Altuera topografikoa

$\theta [^{\circ}C]$ Giro-tenperatura

Koroa-efektuagatik galerak sortzen badira, adierazpen honen bitartez lor daiteke galeren kalkulua:

$$P_{faseko} \left[\frac{kW}{km} \right] = \frac{241}{\delta} \cdot (f + 25) \cdot \sqrt{\frac{r_{eruzale}}{GMD}} \cdot \left[\frac{U_m}{\sqrt{3}} - \frac{U_c}{\sqrt{3}} \right]^2 \cdot 10^{-9}$$

Eta guztizko galerak:

$$P[kW] = P_{faseko} \cdot Fase_kopurua \cdot L[km]$$

3 ERREGIMEN IRAUNKORREKO FUNTZIONAMENDUA

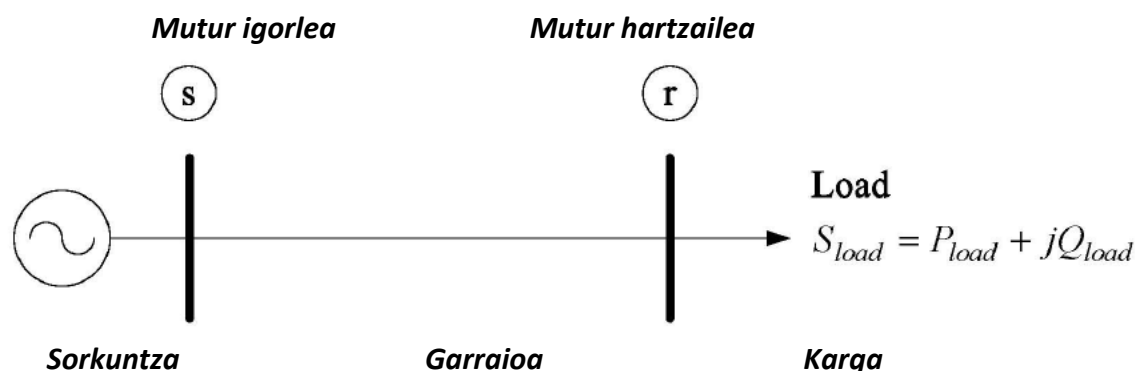
3.1 Sarrera

Energia-sistema elektrikoaren elementu ohikoenak eta luzeenetarikoak garraio-lineak dira. Garraio-lineen diseinu elektrikoa analisi oso interesgarria da, eta haren helburua da linearen ezaugarriak energia-sistemaren garraio-eskakizunetara moldatzea.

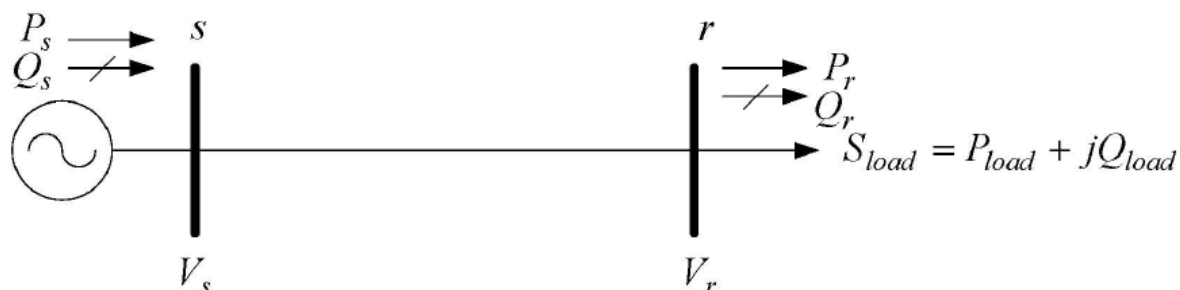
Garraio-linea baten diseinu elektrikoa gauzatzen denean, aurreko atalean definitu diren lau parametro elektrikoak erabiltzen dira: erresistentzia, induktantzia, kapazitantzia eta konduktantzia. Parametro horietako bakoitzaren azterketa prozedura oso delikatu da, linea bakoitzaren ezaugarri partikularrek eragina dutelako parametro horien balioetan.

3.2 Garraio-lineen zirkuitu baliokideak

Energia-elktrikoaren garraioaren analisiak egiterakoan, sistema horien helburuak definitu behar dira, hots, energia sorkuntza-puntuetatik kargetaraino garraiatzea.

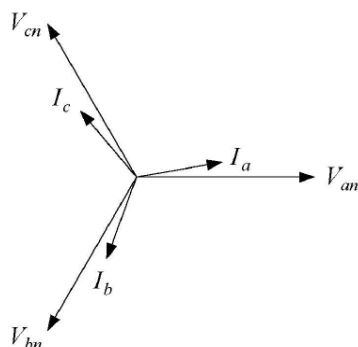


Energia-garraioaren azterketa egiterakoan, linearen muturretako tentsio eta potentzien portaera aztertzen da.

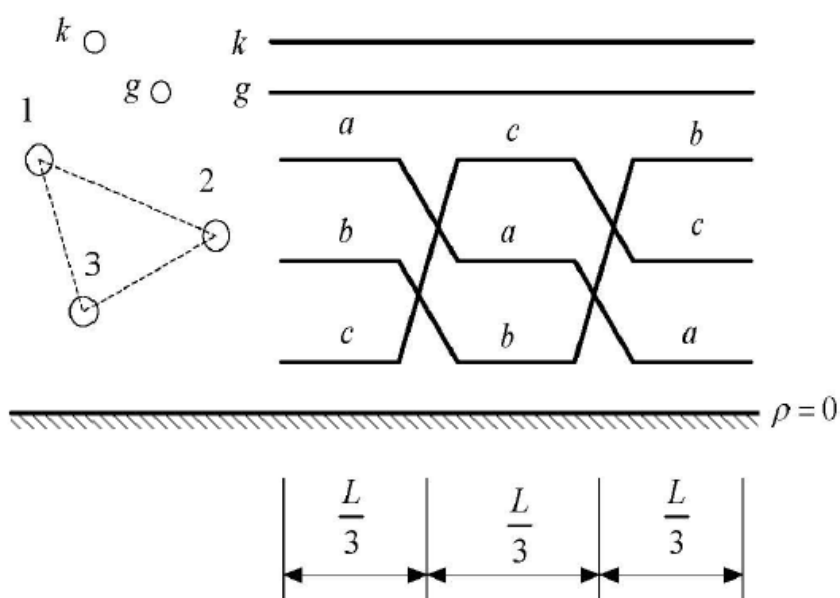


Azterketa hori egiterakoan, honako hipotesi hauek egingo dira:

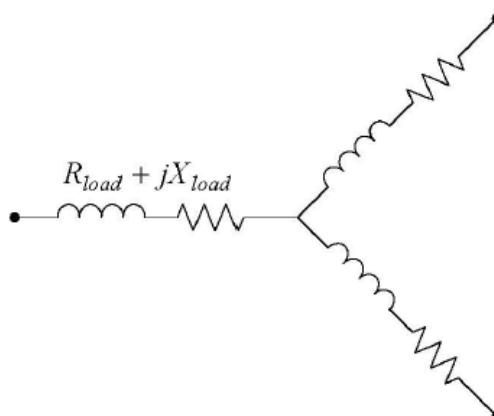
- Tentsioak eta intentsitateak orekatuak daude.



- Lineen transposizioa perfektua da.



- Kargak trifasikoak, simetrikoak eta orekatuak dira.



Aurreko hipotesiak onargarritzat har daitezke, nahiz eta lineen transposiziorik ez egin, ez-transposizio horren ondorioz sortuko liratekeen asimetrien ehunekoak mespretxagarriak direlako.

Lineen funtzionamenduaren analisia egin ahal izateko, garraio-lineen modelo egoki bat definitu beharra dago. Existitzen diren modeloak lineen luzeraren arabera sailkatzen dira:

- Linea laburrak.
- Linea ertainak.
- Linea luzeak.

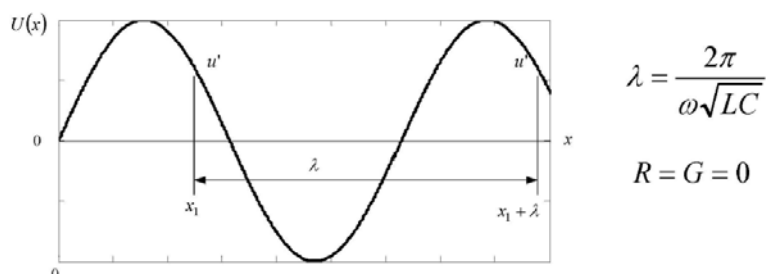
Aurreko sailkapena lineen luzeran eta lineen parametroekin lan egiterakoan gauzatzen diren hurbilketetan oinarritzen da.

Garraio-lineak lau parametro elektrikorekin definitzen dira: erresistentzia, induktantzia, kapazitantzia eta konduktantzia. Parametro horiek uniformeki banatuta daude linearen luzera osoan zehar. Luzera handiko lineetan eta kalkulu zehatzetan, kontuan hartu behar da parametroen luzerarekiko mendekotasun hori. Luzera ertaineko lineetan, kapazitantzia linearen muturretan kontzentratuta dagoela onar daiteke, kalkuluetan errore esanguratsurik egin gabe. Lineak laburrak direnean, suszeptantziaren eragina mespretxa daiteke.

50 Hz-eko maiztasuna duten lineetan, lineen luzeraren sailkapena egiteko, honako distantzia hauek erabiltzen dira:

- Linea laburrak 80 km baino gutxiagoko lineak.
- Linea ertainak 80 km eta 240 km arteko lineak.
- Linea luzeak 240 km baino gehiagoko lineak.

Aurreko sailkapena egiteko erabili den irizpidea linearen luzeraren (L) eta uhin-luzeraren (λ) arteko alderaketa izan da.

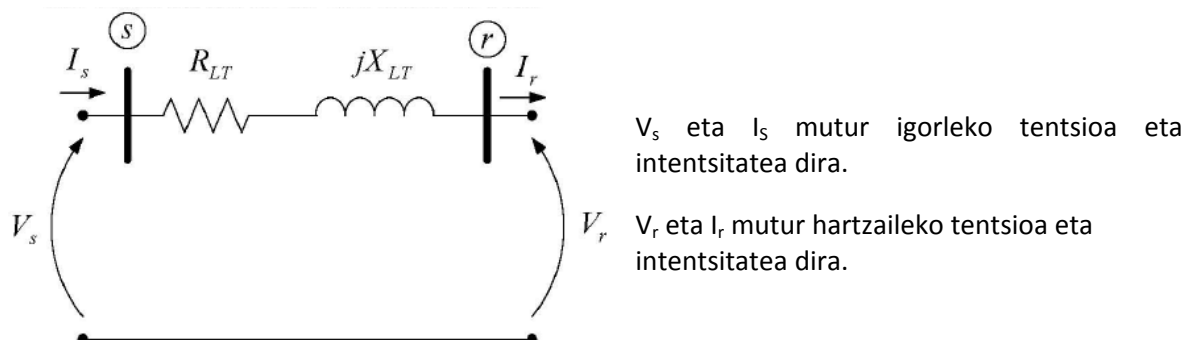


Normalean, erdi-tentsioko lineak linea labur gisa azter daitezke, eta goi-tentsioko lineak linea ertain edo linea luze gisa.

3.2.1 Linea laburrak

Linea laburrek, normalean, 6.000 km-ko uhin-luzerak dituzte eta, uhin-luzerarekin alderatuta luzera txikia dutenez, luzera-unitateko kapazitantziaren eta karga-intentsitatearen (I_{chg}) garrantzia mespretxagarriak dira ikuspuntu elektrikitik. Hori dela eta, linea horien analisia nabarmen errazten da, dagokion zirkuitu baliokidean kapazitantziak mespretxatuko direlako.

Aurreko hipotesiari jarraituz, linea labur baten zirkuitu baliokidea R_{LT} osagai aktibo batekin eta X_{LT} izaera induktibodun osagai erraktibo batekin adieraziko da:



Kirchoff-en legeak aurreko zirkuituari aplikatuz, sistemaren portaera deskribatzen duten ekuazioak lortzen dira:

$$\begin{cases} I_s = I_r \\ V_s = (R_{LT} + jX_{LT})I_s + V_r \end{cases}$$

Aurreko ekuazioetatik abiatuta, honako ekuazio honekin defini daiteke linearen tentsio-erorketa:

$$\Delta V = (R_{LT} + jX_{LT})I_s$$

Aurreko ekuazioak aztertuz, kontsumitzaileen eskariaren jaitziera batek (load) I_r -ren jaitziera sortuko duela ikus daiteke, eta, horren ondorioz, linearen ΔV tentsio-erorketa ere gutxitu egingo da.

Orduan, mutur hartzaileko V_r tentsioa mutur igorleko V_s tentsioaren maila inguru arte handituko da, eta mutur igorleko tentsioaren balioa hartuko du linea hutsean dagoenean.

Errealitatean, linea baten karga bat-batean murrizterakoan sor daitekeen tentsio-igoerak ez du tentsio izendatua % 5 baino gehiago gainditu behar, kontsumitzaileak kalteak jasan ez ditzan. Beraz, linearen proiektua gauzatzeko, arrazoizko balioen artean dimentsionatu behar da linearen tentsio-erorketa.

Linearen operazioaren ikuspuntutik, garrantzitsuagoak dira linearen muturreko tentsioen balio absolutuak beren arteko desfaseak baino.

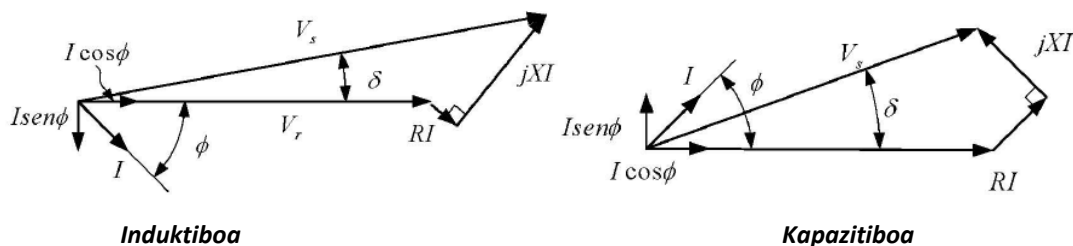
3.2.1.1 Erregulazioa

Garraio-linea baten tentsioaren erregulazioa mutur hartzailean gertatzen den tentsioaren aldaketa da, linea hutsetik karga izendatura (ala alderantziz) pasatzen denean, mutur igorleko tentsioa konstantea denean, eta kargaren potentzia-faktore jakin baterako.

Aldaketa hori, normalean, mutur hartzaileko tentsio izendatuarekiko adierazten da:

$$\text{Erregulazioa (\%)} = \frac{|V_{rn}| - |V_r|}{|V_r|} \cdot 100$$

Energia-sistema elektrikoaren kargak normalean inдукtiboak direnez, tentsioaren jaitziera potentzia-faktore inдукtibo batekin gertatzen dela suposatzen da, eta tentsioaren igoera potentzia-faktore kapazitibo batekin.

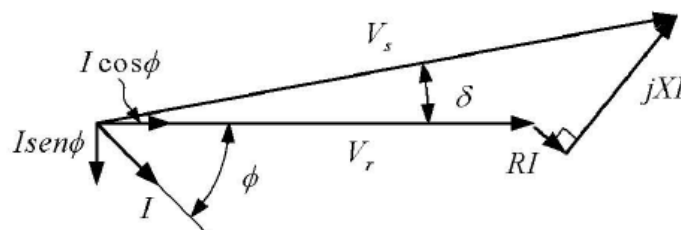
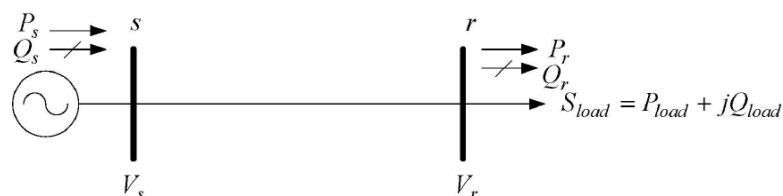


Erregulazioa kargaren eta kargaren potentzia-faktorearen menpekoa da. Sistema erradialetan oso argi egoten dira definituak mutur igorlea (sorgailuak konektatuta dauden muturra) eta hartzailea (kargen muturra). Garraio-sarea, ordea, saretua da. Hori dela eta, erregulazio kontzeptua ez da aplikatzeko erraza. Ondorioz, energia-sistema elektrikoaren barra bakoitzeko tentsioen egoera aztertzen da, karga-baldintza bakoitzerako.

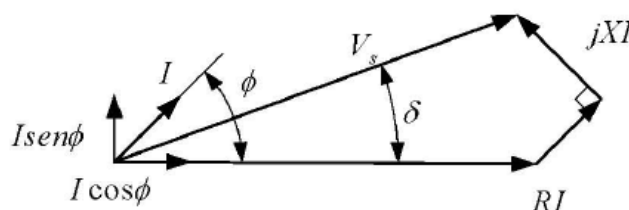
Batzuetan, erregulazioaren balioa garraio-lineen diseinurako parametro gisa erabiltzen da, funtzionamendu-tentsio jakin baterako. % 10 da diseinuan erabiltzen den ohiko erregulazio-balioa.

3.2.1.2 Linea laburren tentsioaren erregulazioaren ebazpen analitikoa, mutur hartzaileko baldintzak jakinak direnean

Erregulazioa aztertzerakoan, kasurik ohikoena izaten da mutur hartzaileko baldintzak jakinak direnean gertatzen den tentsio-erorketaren kalkulua. Kalkulu hori egiteko, mutur hartzaileko tentsioa erreferentzia gisa erabiltzen da linea laburretan, hots, $V_r = |V_r| \angle 0^\circ$



Linea laburrean diagrama fasoriala. Potentzia-faktore induktiboa (lagging)



Linea laburrean diagrama fasoriala. Potentzia-faktore kapazitiboa (leading)

Potentzia-faktore induktiboen kasuan, ϕ eta $\sin(\phi)$ negatiboak dira. Potentzia-faktore kapazitiboen kasuan, ϕ eta $\sin(\phi)$ positiboak dira. Potentzia-faktorea, $\cos(\phi)$, beti da positiboa.

Linea laburren modeloan, aurretik definitu diren ekuazioak hartuko dira abiapuntzat:

$$\begin{cases} I_s = I_r \\ V_s = (R_{LT} + jX_{LT})I_s + V_r \end{cases}$$

Linea hutsean badago, igorleko eta hartzaileko tentsioak berdinak izango dira:

$$\begin{cases} V_s = (R_{LT} + jX_{LT})I_s + V_r \rightarrow V_s = V_r \\ |V_{r0}| = |V_s| \end{cases}$$

Eta linea kargan dagoenean, mutur hartzaileko tentsioa V_r izango da; beraz, erregulazio-faktorea maximoa izango da potentzia-faktore induktiboentzat (atzeratuak), eta minimoa edo negatiboa potentzia-faktore kapazitiboentzat (aurreratuak).

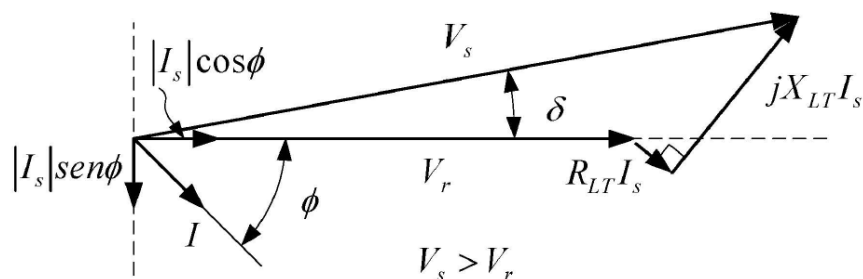
Potentzia-faktorea induktiboa dela joz:

$$\begin{aligned} I_s &= |I_r| \cos \phi + j |I_r| \sin \phi && \text{Non,} \\ V_s &= V_r + Z_{LT} I_s && Z_{LT} = R_{LT} + jX_{LT} \end{aligned}$$

Beraz:

$$V_s = (|V_r| + |I_r| R_{LT} \cos \phi - |I_r| X_{LT} \sin \phi) + j(|I_r| R_{LT} \sin \phi - |I_r| X_{LT} \cos \phi)$$

Aurreko adierazpena erabiliz, diagrama fasoriala eraiki daiteke potentzia-faktore induktiboentzat:



Igorleko tentsioaren modulua:

$$|V_s| = \sqrt{(|V_r| + |I_r| R_{LT} \cos \phi - |I_r| X_{LT} \sin \phi)^2 + (|I_r| R_{LT} \sin \phi - |I_r| X_{LT} \cos \phi)^2}$$

$|I_r| \cdot X_{LT}$ eta $|I_r| \cdot R_{LT}$ % 10 baino txikiagoko tentsio-erorketak badira, orduan:

$$|V_s| = |V_r| + |I_r| R_{LT} \cos \phi - |I_r| X_{LT} \sin \phi$$

Orain, erregulazioaren definizioa erabiliz:

$$\text{Erregulazioa (\%)} = \frac{|V_{r0}| - |V_r|}{|V_r|} \cdot 100 = \frac{100 \cdot |I_r|}{|V_r|} \cdot (R_{LT} \cdot \cos \phi - X_{LT} \cdot \sin \phi)$$

Eta tentsioaren ordeztentzia erabiliz:

$$kVA = \frac{\sqrt{3}|V_{LLr}||I_r|}{1000}$$

Orduan:

$$\text{Erregulazioa (\%)} = \frac{100.000 \cdot [kVA]}{|V_{LLr}|^2} \cdot (R_{LT} \cdot \cos\phi - X_{LT} \cdot \sin\phi)$$

Ekuazio horrek erregulazio jakin baterako linea jakin batetik garraia daitekeen kargaren balioa adierazten du, eta linearen luzeraren alderantziz proportzionala izango da.

Ekuazio horrekin % 0,5eko zehaztasunarekin kalkula daiteke mutur hartzaileko tentsioaren balioa, tentsio-erorketa erresistibo eta induktiboek tentsio izendatuaren % 10 ez badute gaitzen.

3.2.1.3 Linea laburren tentsioaren erregulazioaren ebazpen analitikoa, mutur igorleko baldintzak jakinak direnean

Mutur igorleko baldintzak jakinak direnean mutur hartzaileko baldintzak kalkulatzeko, erreferentzia gisa V_s erabiltzen da:

$$V_s = |V_s| \angle 0^\circ$$

$$V_r = V_s - Z_{LT} I$$

Kasu honetarako diagrama fasorialak:

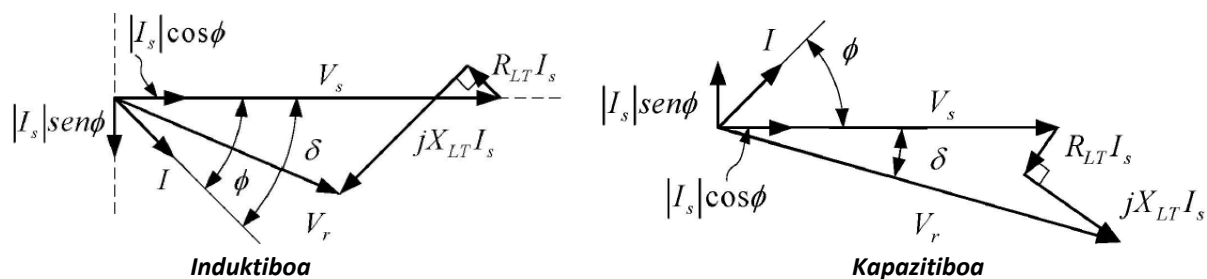


Diagrama fasorialetatik abiatuz:

$$V_r = (|V_s| - |I|R_{LT} \cos\phi + |I|X_{LT} \sin\phi) - j(|I|X_{LT} \cos\phi + |I|R_{LT} \sin\phi)$$

Hartzaileko tentsioaren modulua:

$$|V_r| = \sqrt{(|V_s| - |I|R_{LT} \cos\phi + |I|X_{LT} \sin\phi)^2 + (|I|X_{LT} \cos\phi + |I|R_{LT} \sin\phi)^2}$$

Koadraturako osagaiak mespretxatuz:

$$|V_r| = |V_s| - |I|R_{LT} \cos\phi + |I|X_{LT} \sin\phi$$

3.2.1.4 Baldintza mistodun kasuen analisia

Kasu batzuetan, baldintza mistoak erabiltzen dira. Adibidez, kargaren potentzia-faktorea eta igorleko tentsioa, edo igorleko potentzia-faktorea eta hartzailleko tentsioa, eta falta den tentsioa kalkulatu nahi dira intentsitate jakin baterako.

Kasu horiek ezin daitezke ebatzi adierazpen analitikoak erabiliz. Adibidez, hartzailleko tentsioa kalkulatu nahi bada potentzia-faktore jakin baterako, igorleko tentsioa eta intentsitatea jakinik, honako ekuazio hau lortzen da:

$$|V_s| = \sqrt{\left(|V_r| + |I_r|R_{LT} \cos \phi - |I_r|X_{LT} \sin \phi\right)^2 + \left(|I_r|R_{LT} \sin \phi - |I_r|X_{LT} \cos \phi\right)^2}$$

V_r kalkulatu nahi da; beraz, aurreko ekuazioko alde biak karratura berretuz, V_r -ren ekuazio koadratiko bat lortzen da. Horrelako kasuak ebazteko metodo iteratiboak erabili beharko dira, edo ebazpena grafikoki gauzatu.

3.2.1.5 Linea laburretako galera erresistiboak

Linea trifasiko batean Joule-ren efektuagatik gertatzen diren galerak eroale baten erresistentziaren eta haren intentsitatearen karratuaren hirukoitza dira:

$$Loss = 3R_{LT}|I|^2$$

Aurreko balioa linearen kargarekiko ehuneko gisa adieraz daiteke honako ekuazio honekin:

$$\%Loss = \frac{100\sqrt{3}R_{LT}|I|^2}{|V_{L-Lr}|\cos\phi_r}$$

Non,

V_{L-Lr} linea laburraren mutur hartzailleko tentsio konposatua, eta

ϕ_r mutur hartzailleko potentzia-faktorearen angelua baitira.

Batzuetan, lineatik garraia daitekeen potentzia maximoa kalkulatu nahi da, galeraren ehuneko bat gainditu gabe. Kasu horietan aplikatu beharreko adierazpena honako hau da:

$$P = \frac{\%Loss|V_{L-Lr}|^2 \cos^2 \phi_r}{100.000R_{LT}}$$

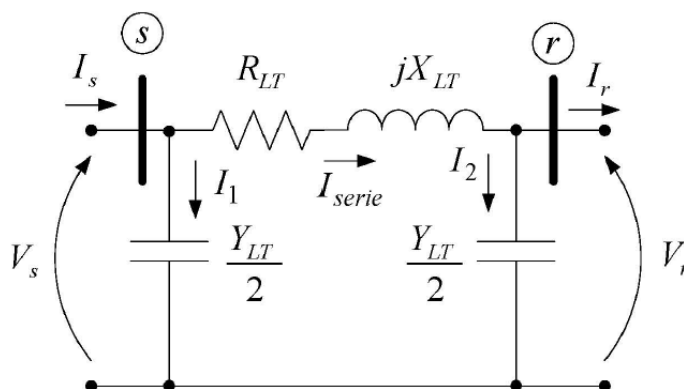
Ekuazio horrek galera-ehuneko jakin baterako garraia daitekeen potentzia adierazten du, eta potentziaren balioa galeren zuzenki proportzionala eta luzeraren alderantziz proportzionala izango da.

3.2.2 Linea ertainak

Luzera ertainetan, 80 km eta 240 km artean, admitantzia guztiz kapazitiboa izaten da normalean (tentsio-maila oso altuen kasuan, kontuan hartu beharko da ihes-konduktantzia ere), eta admitantzia hori kontuan hartu beharko da linearen simulazioan.

Kapazitantzia hori bi zati berdinetan bana daiteke, ereduaren muturretan jarriz, eta horrela π eredu eraiki.

3.2.2.1 π eredu



$$\begin{aligned} I_s &= I_1 + I_{serie} & I_{serie} &= \frac{V_s - V_r}{Z_{LT}} \\ I_{serie} &= I_2 + I_r \end{aligned}$$

Diagramatik abiatuz:

$$\begin{cases} V_s = Z I_{serie} + V_r \\ I_{serie} = \frac{Y_{LT}}{2} V_r + I_r \end{cases} \Rightarrow V_s = \left(V_r \frac{Y_{LT}}{2} + I_r \right) Z + V_r \Rightarrow$$

$$\Rightarrow V_s = \left(\frac{Z_T Y_{LT}}{2} + 1 \right) V_r + Z I_r$$

I_s kalkulatzeko, mutur igorleko kapazitantzia $V_s \cdot Y_{LT}/2$ dela ikusita eta adar horretako intentsitatea gehituz:

$$\begin{cases} I_s = I_1 + I_{serie} \\ I_1 = \frac{Y_{LT}}{2} V_r \\ I_{serie} = \frac{Y_{LT}}{2} V_r + I_r \end{cases} \Rightarrow I_s = \frac{Y_{LT}}{2} V_s + \frac{Y_{LT}}{2} V_r + I_r$$

$$\Rightarrow V_s = \left(V_r \frac{Y_{LT}}{2} + I_r \right) Z + V_r$$

Eta horrela I_s lortzen da:

$$I_s = V_r Y_{LT} \left(1 + \frac{Y_{LT}}{4} \right) + I_r \left(1 + \frac{Z_{LT} Y_{LT}}{2} \right)$$

Eta linearen parametroak kontuan hartuz:

$$\begin{cases} V_s = \left(V_r \frac{Y_{LT}}{2} + I_r \right) Z + V_r \\ I_s = V_r Y_{LT} \left(1 + \frac{Y_{LT}}{4} \right) + I_r \left(1 + \frac{Z_{LT} Y_{LT}}{2} \right) \end{cases}$$

$$\begin{bmatrix} V_s \\ I_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_r \\ I_r \end{bmatrix} \quad \text{Non,} \quad \begin{cases} A = D = \frac{Z_{LT} Y_{LT}}{2} + 1 \\ B = Z_{LT} \\ C = Y_{LT} \left(1 + \frac{Z_{LT} Y_{LT}}{4} \right) \end{cases}$$

$$AD - BC = 1$$

Aurreko ekuazioak erabiliz, mutur hartzaileko intentsitate eta tentsioak askatzen badira, honako ekuazio hauek lortzen dira:

$$\begin{cases} I_r = \frac{AV_s - CI_s}{AD - BC} \\ V_r = \frac{DV_s - BI_s}{AD - BC} \end{cases}$$

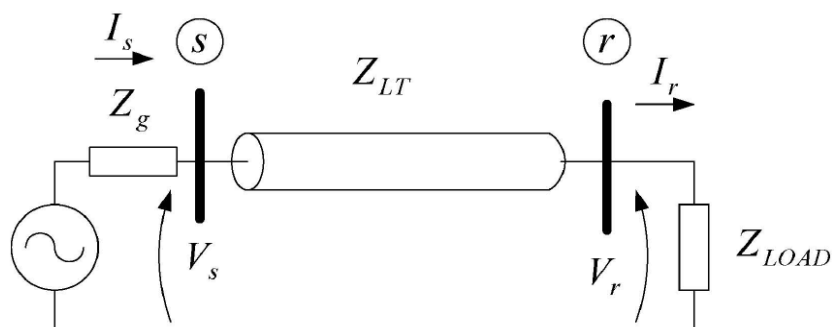
Eta matrizialki adierazita:

$$\begin{bmatrix} V_r \\ I_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D & -B \\ -C & A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_s \\ I_s \end{bmatrix} \quad \text{Non,} \quad [T]^{-1} = \begin{bmatrix} D & -B \\ -C & A \end{bmatrix}$$

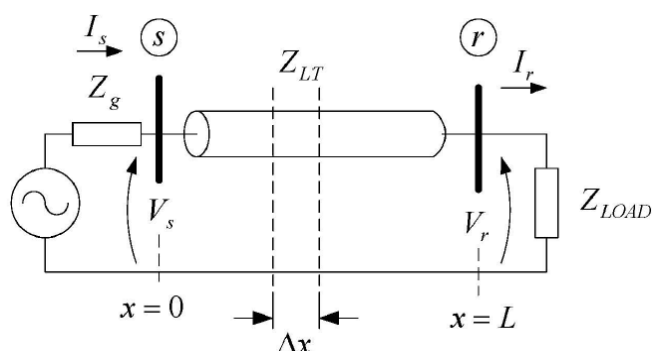
3.2.3 Linea luzeak

Garraio-linea baten funtzionamendua era zehatz batean simulatu ahal izateko, R [Ω/km], L [Henry/km], G [Siemens/km] eta C [Faraday/km] parametro uniformeki banatuak dituen linea bat hartuko da.

3.2.3.1 Kargan dagoen garraio-linea baten diagrama

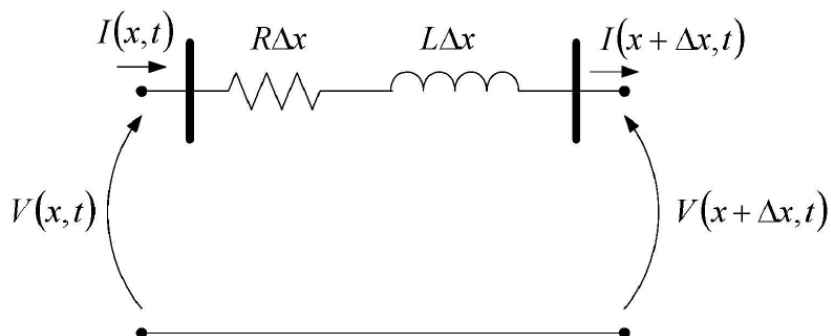


Linearen zirkuitu baliokidea R , L , G eta C luzera-unitateko parametro banatuak dituzten sekzio infinitesimalak erabiliz eraiki daiteke. Egoera horretako analisirako, demagun lineak L luzera osoa duela, eta x hartzen dela luzetarako erreferentzia noranzkotzat, $x=0$ mutur igoilea izanik eta $x=L$ mutur hartzailea.



Aurreko diagraman Δx elementua hartzen bada, haren erresistentzia $R \cdot \Delta x$ izango da, inдукtantzia $L \cdot \Delta x$, kapazitantzia $C \cdot \Delta x$ eta ihes-konduktantzia $G \cdot \Delta x$. Egoera horretan sekzioaren tamaina bikoiztu egiten bada, $2 \cdot \Delta x$, orduan, sekzioaren parametroak ere bikoiztu egingo dira.

Serieko erresistentziak eta inдукtantiak aztertuz:



Aurreko diagraman, mutur bietako intentsitateak berdinak direla betetzen da:

$$I(x, t) = I(x + \Delta x, t)$$

Kirchoff-en tentsioen legea aplikatuz:

$$V(x, t) = R\Delta x I(x, t) + L\Delta x \frac{\partial I(x, t)}{\partial t} + V(x + \Delta x, t)$$

Aurreko adierazpenean eragiketak eginez:

$$\frac{V(x, t) - V(x + \Delta x, t)}{\Delta x} = RI(x, t) + L \frac{\partial I(x, t)}{\partial t}$$

Sekzioaren luzera infinitesimalki txikia egiten bada, orduan:

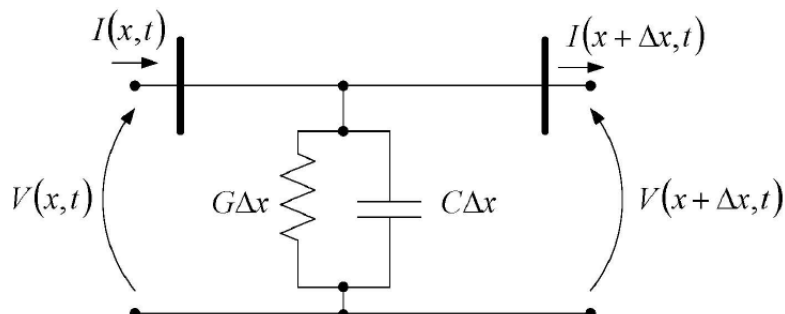
$$\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \left[\frac{V(x, t) - V(x + \Delta x, t)}{\Delta x} \right] = - \frac{\partial V(x, t)}{\partial x}$$

Azkenik, honako adierazpen hau lortzen da:

$$\frac{\partial V(x, t)}{\partial x} = RI(x, t) + L \frac{\partial I(x, t)}{\partial t}$$

Adierazpen horretan, tentsioaren luzerarako aldaketa espazio-denboran intentsitatearen aldaketarekin erlazionatzen da.

Bestalde, ihes-konduktantzia eta kapazitantzia-paraleloaren parametroak bakarrik aztertuz:



Aurreko diagraman, mutur bietako tentsioak berdinak direla betetzen da:

$$V(x, t) = V(x + \Delta x, t)$$

Kirchoff-en intentsitateen legea aplikatuz:

$$I(x, t) = G\Delta x V(x, t) + C\Delta x \frac{\partial V(x, t)}{\partial t} + I(x + \Delta x, t)$$

Aurreko adierazpenean eragiketak eginez:

$$\frac{I(x, t) - I(x + \Delta x, t)}{\Delta x} = GV(x, t) + C \frac{\partial V(x, t)}{\partial t}$$

Sekzioaren luzera infinitesimalki txikia egiten bada, orduan:

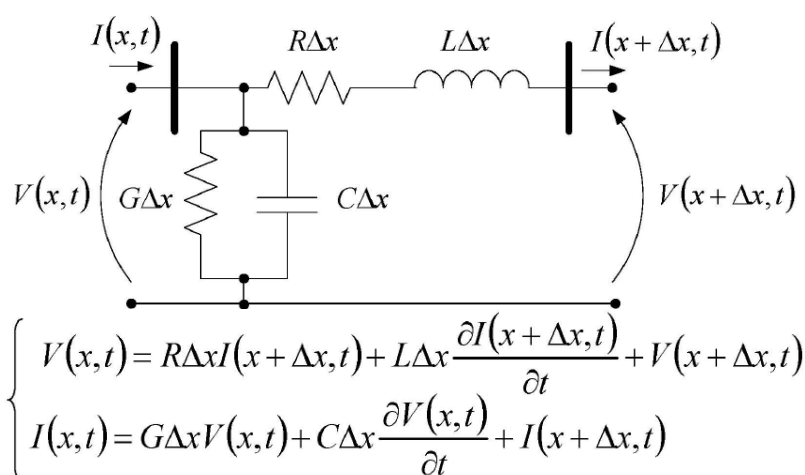
$$\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \left[\frac{I(x,t) - I(x + \Delta x, t)}{\Delta x} \right] = - \frac{\partial I(x,t)}{\partial x}$$

Azkenik, honako adierazpen hau lortzen da:

$$\frac{\partial I(x,t)}{\partial x} = GV(x,t) + C \frac{\partial V(x,t)}{\partial t}$$

Adierazpen horretan, intentsitatearen luzerarako aldaketa espazio-denboran tentsioaren aldaketarekin erlazionatzen da.

Orain, serie- eta paralelo-osagaiak batera hartuz, honako eredu hau eraikiko da Δx luzeradun sekziolarako:



Aurreko adierazpenean eragiketak eginez:

$$\begin{cases} \frac{V(x,t) - V(x + \Delta x, t)}{\Delta x} = RI(x + \Delta x, t) + L \frac{\partial I(x + \Delta x, t)}{\partial t} \\ \frac{I(x,t) - I(x + \Delta x, t)}{\Delta x} = GV(x,t) + C \frac{\partial V(x,t)}{\partial t} \end{cases} \quad \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \begin{cases} - \frac{\partial V(x,t)}{\partial x} = RI(x,t) + L \frac{\partial I(x,t)}{\partial t} \\ - \frac{\partial I(x,t)}{\partial x} = GV(x,t) + C \frac{\partial V(x,t)}{\partial t} \end{cases}$$

Garraio-sistemaren seinaleak denborarekiko harmonikoak izaten direnez, abiadura angeluar konstanteko seinale harmoniko batekin lan egiten dela joz, maiztasun-eremura alda daiteke aurreko adierazpena:

$$\begin{cases} - \frac{\partial V(x, \omega)}{\partial x} = (R + j\omega L)I(x, \omega) \\ - \frac{\partial I(x, \omega)}{\partial x} = (G + j\omega C)V(x, \omega) \end{cases}$$

Deribatu partzialetako lehen ordenako ekuazio diferentzial horiek linearen funtzionamendua definitzen dute. Ekuazio horiek modu erraz batean adieraz daitezke, denbora-eremuko ekuazioak espazioarekiko deribatuz:

$$\frac{\partial^2 V(x,t)}{\partial x^2} = R \frac{\partial I(x,t)}{\partial x} + L \frac{\partial \left(\frac{\partial I(x,t)}{\partial t} \right)}{\partial t}$$

Aurreko adierazpenean intentsitatearen espazioarekiko deribatua ordezkatzeko bada, honako adierazpen hau lortzen da:

$$\frac{\partial^2 V(x,t)}{\partial x^2} - (RC + GL) \frac{\partial V(x,t)}{\partial x} - LC \frac{\partial^2 V(x,t)}{\partial t^2} - RGV(x,t)$$

3.2.3.2 Galerarik gabeko linea baten kasua

Galerarik gabeko linea baten kasu partikularrean ($R=G=0$), oso goi-tentsioko lineetan gertatzen den moduan, lortzen den ekuazio diferentziala uhin unidimentsional baten berdina da:

$$\frac{\partial^2 V(x,t)}{\partial x^2} = LC \frac{\partial^2 V(x,t)}{\partial t^2}$$

Aurreko adierazpena agertzen da mekanikan mintz oszilatzaileak aztertzen direnean, akustikan oszilazio mota batzuk aztertzerakoan, eta baita elektromagnetismoan ere (aztertzen ari garen kasua, hain zuzen ere).

Antzeko modu batean, eszitazio mota harmonikoa bada, honako ekuazio hau lortzen da:

$$\frac{\partial^2 V(x,\omega)}{\partial x^2} = ZYV(x,\omega) \quad \text{Non,} \quad \begin{cases} Z = R + j\omega L \\ Y = G + j\omega C \end{cases}$$

3.2.3.3 Ekuazio diferentzialen ebazpena

Ekuazio diferentzialen ebazpena egingo da denborarekiko harmonikoak diren seinaleentzat. Demagun aurreko ekuazioak mota honetako emaitza bat duela:

$$V(x,\omega) = e^{\lambda x}$$

Orduan:

$$\frac{\partial^2 V(x,\omega)}{\partial x^2} - ZYV(x,\omega) = 0 \quad \Rightarrow \quad V(x,\omega) = e^{\lambda x} \quad \Rightarrow \quad \begin{cases} \frac{\partial V(x,\omega)}{\partial x} = \lambda e^{\lambda x} \\ \frac{\partial^2 V(x,\omega)}{\partial x^2} = \lambda^2 e^{\lambda x} \end{cases}$$

$$\lambda^2 e^{\lambda x} - ZY e^{\lambda x} = 0 \quad \Rightarrow \quad \lambda^2 = ZY \quad \begin{cases} \lambda_1 = -\sqrt{ZY} \\ \lambda_2 = \sqrt{ZY} \end{cases}$$

$$\Downarrow$$

$$V(x, \omega) = A_1 e^{-\sqrt{ZY}x} + A_2 e^{\sqrt{ZY}x}$$

Intentsitatearen ebazpenaren kasurako:

$$I(x, \omega) = -\frac{1}{Z} \frac{\partial V(x, \omega)}{\partial x} \longrightarrow I(x, \omega) = -\frac{1}{Z} \frac{\partial (A_1 e^{-\sqrt{ZY}x} + A_2 e^{\sqrt{ZY}x})}{\partial x}$$

$$\Downarrow$$

$$I(x, \omega) = \frac{1}{Z} (\sqrt{ZY} A_1 e^{-\sqrt{ZY}x} - \sqrt{ZY} A_2 e^{\sqrt{ZY}x})$$

3.2.3.4 Hedapen konstantea eta inpedantzia adierazgarria

Linea baten hedapen konstantea honako adierazpen honen bidez definitzen da:

$$\gamma = \sqrt{ZY} = \alpha + j\beta$$

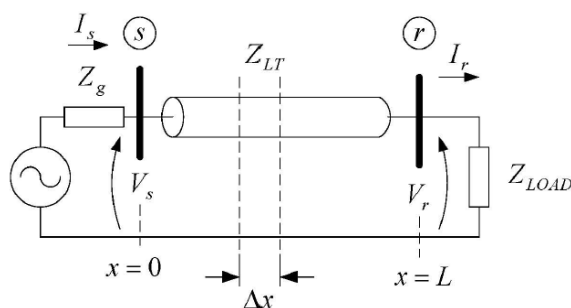
Eta linea baten inpedantzia adierazgarria honako adierazpen honen bidez:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{Z}{Y}}$$

Aurreko tentsio- eta intentsitate-ebazpenetan parametro berri hauek ordezkatzuz:

$$\begin{cases} V(x, \omega) = A_1 e^{-\gamma x} + A_2 e^{\gamma x} \\ I(x, \omega) = \frac{1}{Z_0} (A_1 e^{-\gamma x} - A_2 e^{\gamma x}) \end{cases}$$

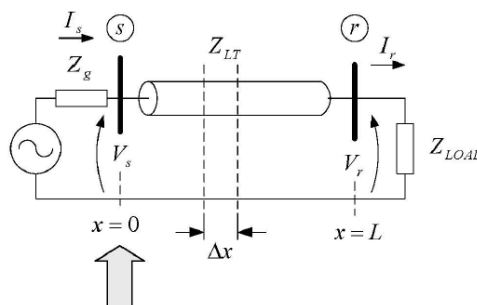
A_1 eta A_2 integrazio-konstanteak dira, ekuazio diferentzialen ebazpena osatzen duten kurba-familietatik datoz. Integrazio-konstante horiek ezabatzeko, linearen muturretako baldintzak aztertu behar dira.



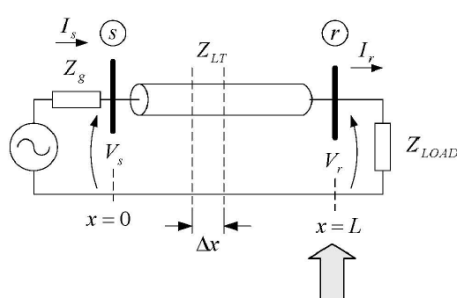
Mutur igorleko baldintzak (x=0):

$$x = 0$$

$$\begin{cases} V(x = 0, \omega) = V_s \\ I(x = 0, \omega) = I_s \end{cases}$$



Mutur hartzaileko baldintzak (x=L):



$$x = L$$

$$\begin{cases} V(x = L, \omega) = V_r \\ I(x = L, \omega) = I_r \end{cases}$$

Mutur igorleko baldintzak tentsio eta intentsitateen ebazpenetan ordezkatuz:

$$\begin{cases} V(x = 0, \omega) = V_s = A_1 + A_2 \\ I(x = 0, \omega) = I_s = \frac{1}{Z_0}(A_1 - A_2) \end{cases}$$

Bi ekuazio eta bi aldaietako ekuazio-sistema lortu da. A_1 eta A_2 ebatziz:

$$A_1 = \frac{(V_s + Z_0 I_s)}{2}$$

$$A_2 = \frac{(V_s - Z_0 I_s)}{2}$$

A_1 eta A_2 intentsitate eta tentsioen ebazpenetan ordezkatuz, garraio-linearen intentsitatea eta tentsioa mutur igorlearen funtzioan kalkulatzeko adierazpenak lortzen dira:

$$\begin{cases} I(x, \omega) = \frac{1}{Z_0} \left(\frac{(V_s + Z_0 I_s)}{2} e^{-\gamma x} - \frac{(V_s - Z_0 I_s)}{2} e^{\gamma x} \right) \\ V(x, \omega) = \frac{(V_s + Z_0 I_s)}{2} e^{-\gamma x} + \frac{(V_s - Z_0 I_s)}{2} e^{\gamma x} \end{cases}$$

Intentsitate eta tentsioen balioak mutur hartzailekoen funtzioan kalkulatu nahi badira, mutur igorleko baldintzak ordezkatu beharrean mutur hartzailekoak ordezkatuz eta, horrela, lortutako ekuazioak ebatziz kalkulatu dira:

$$\begin{cases} V(x=L, \omega) = V_r = A_1 e^{-\gamma L} + A_2 e^{\gamma L} \\ I(x=L, \omega) = I_r = \frac{1}{Z_0} (A_1 e^{-\gamma L} - A_2 e^{\gamma L}) \end{cases} \left\{ \begin{array}{l} A_1 = \frac{(V_r + Z_0 I_r)}{2} e^{\gamma L} \\ A_2 = \frac{(V_r - Z_0 I_r)}{2} e^{-\gamma L} \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} V(x, \omega) = \frac{(V_r + Z_0 I_r)}{2} e^{-\gamma(L-x)} + \frac{(V_r - Z_0 I_r)}{2} e^{\gamma(L-x)} \\ I(x, \omega) = \frac{1}{Z_0} \left(\frac{(V_r + Z_0 I_r)}{2} e^{-\gamma(L-x)} - \frac{(V_r - Z_0 I_r)}{2} e^{\gamma(L-x)} \right) \end{array} \right.$$

3.2.3.5 Linea luzeen ekuazioak era hiperbolikoan

Goian mutur igorleko baldintzak jakinak direnean, lortutako ekuazioekin eragiketak eginez honako era honetan idatz daitezke:

$$\left\{ \begin{array}{l} V(x, \omega) = V_s \frac{(e^{-\gamma x} + e^{\gamma x})}{2} + Z_0 I_s \frac{(e^{-\gamma x} - e^{\gamma x})}{2} \\ I(x, \omega) = \frac{1}{Z_0} \left(V_s \frac{(e^{-\gamma x} - e^{\gamma x})}{2} - Z_0 I_s \frac{(e^{\gamma x} - e^{-\gamma x})}{2} e^{\gamma x} \right) \end{array} \right.$$

Eta funtzio hiperbolikoen adierazpenak gogoratu:

$$\begin{array}{l} \sinh(\gamma x) = \frac{e^{\gamma x} - e^{-\gamma x}}{2} \\ \cosh(\gamma x) = \frac{e^{\gamma x} + e^{-\gamma x}}{2} \end{array} \quad \longrightarrow \quad \left\{ \begin{array}{l} V(x, \omega) = V_s \cosh(\gamma x) - Z_0 I_s \sinh(\gamma x) \\ I(x, \omega) = -\frac{V_s}{Z_0} \sinh(\gamma x) + I_s \cosh(\gamma x) \end{array} \right.$$

Mutur hartzaileko baldintzak jakinak direnean, lortutako ekuazioei prozedura bera aplikatuz honako emaitza hau lortzen da:

$$\left\{ \begin{array}{l} I(x, \omega) = -\frac{V_r}{Z_0} \sinh(\gamma(L-x)) + I_r \cosh(\gamma(L-x)) \\ V(x, \omega) = V_r \cosh(\gamma(L-x)) - Z_0 I_r \sinh(\gamma(L-x)) \end{array} \right.$$

Aurreko adierazpenak matrizialki adieraziz:

$$\begin{bmatrix} V(x, \omega) \\ I(x, \omega) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma x) & -Z_0 \sinh(\gamma x) \\ -\frac{\sinh(\gamma x)}{Z_0} & \cosh(\gamma x) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_s \\ I_s \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} V(x, \omega) \\ I(x, \omega) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma(L-x)) & -Z_0 \sinh(\gamma(L-x)) \\ -\frac{\sinh(\gamma(L-x))}{Z_0} & \cosh(\gamma(L-x)) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_r \\ I_r \end{bmatrix}$$

Normalean, linearen muturretako balioekin lan egiten denez, mutur igorleko baldintzak jakinak diren ekuazioetan mutur hartzaileko baldintzak ordezkaturaz ($x=L$):

$$\begin{aligned} V(x=L, \omega) &= V_r \\ I(x=L, \omega) &= I_r \end{aligned} \quad \begin{bmatrix} V_r \\ I_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma L) & -Z_0 \sinh(\gamma L) \\ -\frac{\sinh(\gamma L)}{Z_0} & \cosh(\gamma L) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_s \\ I_s \end{bmatrix}$$

Eta mutur hartzaileko baldintzak jakinak diren ekuazioetan mutur igorleko baldintzak ordezkaturaz ($x=0$):

$$\begin{aligned} V(x=0, \omega) &= V_s \\ I(x=0, \omega) &= I_s \end{aligned} \quad \begin{bmatrix} V_s \\ I_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma L) & -Z_0 \sinh(\gamma L) \\ \frac{\sinh(\gamma L)}{Z_0} & \cosh(\gamma L) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_r \\ I_r \end{bmatrix}$$

3.2.3.6 Linea luzeen konstante orokortuak

Aurreko ekuazio matritzialak era trinkoan adieraziz, linearen konstante orokortuak definitzen dira:

$$\begin{bmatrix} V_s \\ I_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_r \\ I_r \end{bmatrix} \quad \text{Non,} \quad \begin{cases} A = D = \cosh(\gamma L) \\ B = Z_0 \sinh(\gamma L) \\ C = \frac{1}{Z_0} \sinh(\gamma L) \end{cases}$$

3.2.3.7 Linea luzeen ekuazioa denbora-eremuan seinale harmonikoekin

Uhin bidaiariaren teoria hobeto ulertzeko, gogoratu beharra dago intentsitate eta tentsioen emaitzak bigarren ordenako ekuazio diferentzial baten ebazpenetik lortzen direla:

$$\frac{\partial^2 V(x, \omega)}{\partial x^2} - ZYV(x, \omega) = 0 \quad \Longrightarrow \quad V(x, \omega) = A_1 e^{-\gamma x} + A_2 e^{\gamma x}$$

A_1 eta A_2 balio konplexuak dira. Inpedantzia adierazgarria (Z_0) eta hedapen konstantea (γ) ere balio konplexuak direla gogoratuz eta era polarrean adieraziz:

$$\begin{cases} A_1 = |A_1| e^{j\omega t} \\ A_2 = |A_2| e^{j\omega t} \end{cases} \quad \gamma = \alpha + j\beta Z_0 = |Z_0| e^{j\psi}$$

Adierazpen polarrak ekuazio diferentzialen soluzio orokorrean ordezkaturaz:

$$\begin{aligned} V(x, t) &= |A_1| e^{j\omega t} e^{-\alpha x} e^{-j\beta x} + |A_2| e^{j\omega t} e^{\alpha x} e^{j\beta x} \\ V(x, t) &= |A_1| e^{j\psi} e^{-\alpha x} e^{j(\omega t - \beta x)} + |A_2| e^{\alpha x} e^{j(\omega t + \beta x)} \\ I(x, t) &= \frac{|A_1|}{|Z_0|} e^{-\alpha x} e^{j(\omega t - \beta x - \psi)} - \frac{|A_2|}{|Z_0|} e^{\alpha x} e^{j(\omega t + \beta x - \psi)} \\ I(x, t) &= \frac{|A_1|}{|Z_0|} e^{-j\psi} e^{-\alpha x} e^{j(\omega t - \beta x)} - \frac{|A_2|}{|Z_0|} e^{-j\psi} e^{\alpha x} e^{j(\omega t + \beta x)} \end{aligned}$$

Aurreko ekuazioen aldiuneko balioak kalkulatzeko badira:

$$\begin{cases} V(x,t) = |A_1|e^{-\alpha x} \sin(\omega t - \beta x) + |A_2|e^{\alpha x} \sin(\omega t + \beta x) \\ I(x,t) = \frac{|A_1|}{|Z_0|} e^{-\alpha x} \sin(\omega t - \beta x - \psi) - \frac{|A_2|}{|Z_0|} e^{\alpha x} \sin(\omega t + \beta x - \psi) \end{cases}$$

Aurreko ekuazioen osagai sinusoidalak aztertuz, linearen tentsioak, $V(x,t)$, bi osagai edo uhin bidaiari dituela ikus daiteke, eta erraz kalkula daitezke bi uhin bidaiari horien noranzkoak.

Tentsioaren uhin bidaiaria hartuta eta lineak galerarik ez duela joz, analisia errazteko, tentsioa bi funtzioen konbinaketa dela ondoriozta daiteke:

$$V(x,t) = f_1(\omega t - \beta x) + f_2(\omega t + \beta x)$$

Tentsioa t_1 aldiune baterako kalkulatzeko bada, orduan, tentsio hori definituta geratzen da x_1 kokapen baterako:

$$V(x = x_1, t = t_1) = f_1(\omega t_1 - \beta x_1) + f_2(\omega t_1 + \beta x_1)$$

Eta t_2 aldiunean, $t_2 > t_1$ denean:

$$V(x = x_2, t = t_2) = f_1(\omega t_2 - \beta x_2) + f_2(\omega t_2 + \beta x_2)$$

Aurreko garapenean galerarik gabeko linea bat dugula joenez, linea distortsiorik gabe dagoenez, uhin-itxura mantendu egingo da. Beraz, aurreko t_1 eta t_2 aldiunerako funtzioak beren artean berdinak izan beharko dira eta, hori horrela izan dadin, funtzioen argumentuak berdinak izan beharko dira.

Beraz, f_1 funtzioa hartuz:

$$\omega t_1 - \beta x_1 = \omega t_2 - \beta x_2 \quad \Rightarrow \quad \omega(t_2 - t_1) = \beta(x_2 - x_1)$$

Aurreko aldiunetarako $t_2 > t_1$ joenez, $t_2 - t_1$ positiboa izango da. Beraz, aurreko berdintzan $x_2 - x_1 > 0$ izan beharko da, eta, hori horrela izan dadin, $x_2 > x_1$ bete beharko da. Baldintza hori bete dadin, aukera bakarra da uhina denboran zehar mutur igorlerantz joatea. Uhin mota horrek *uhin aurrerakor* edo *uhin erasotzaile* izena hartzen du:

$$V(x,t) = \underbrace{f_1(\omega t - \beta x)}_{\text{Erasotzailea}} + f_2(\omega t + \beta x)$$

Prozedura bera jarraituz f_2 funtzioarentzat:

$$\omega t_1 + \beta x_1 = \omega t_2 + \beta x_2 \quad \Rightarrow \quad \omega(t_2 - t_1) = \beta(x_1 - x_2)$$

Aurreko aldiunetarako $t_2 > t_1$ joenez, $t_2 - t_1$ positiboa izango da. Beraz, aurreko berdintzan $x_1 - x_2 > 0$ izan beharko da, eta, hori horrela izan dadin, $x_1 > x_2$ bete beharko da. Baldintza hori bete dadin, aukera bakarra da uhina denboran zehar mutur hartzailerantz joatea. Uhin mota horrek *uhin islatu* izena hartzen du:

$$V(x,t) = f_1(\omega t - \beta x) + \underbrace{f_2(\omega t + \beta x)}_{\text{Islatua}}$$

Aurreko analisia kontuan hartuta, edozein garraio-linearen tentsio eta intentsitateak bi uhinez osatuta daudela ondoriozta daiteke: uhin erasotzailea (P azpiindizea) eta uhin islatua (R azpiindizea):

$$\begin{cases} V(x,t) = V_P + V_R \\ I(x,t) = I_P + I_R \end{cases}$$

Uhinen arteko erlazio horiek Ohm-en legearen lege baliokide bat betetzen dutela frogatu daiteke. Horren ondorioz:

$$I(x,t) = \frac{V_P - V_R}{Z_0} \quad \text{Eta} \quad \begin{cases} I_P = \frac{V_P}{Z_0} \\ I_R = -\frac{V_R}{Z_0} \end{cases}$$

3.2.3.8 Fase-abiadura

Aurreko atalean ikusi denez, tentsio eta intentsitateen balioak espazioaren eta denboraren menpe daude.

$$V(x,t) = f_1(\omega t - \beta x) + f_2(\omega t + \beta x)$$

Uhin islaturaren portaera bakarrik aztertuz eta bi puntuak fase-komunztaduran kontuan hartuz, bi puntuek baldintza berberak dituztelako, orduan, hedapen-abiadura ω -ren eta β -ren funtzioan egongo da, eta honako erlazio hau beteko du:

$$\omega \cdot t + \beta \cdot x = \text{konstante}$$

Aurreko adierazpenetik abiatuta eragiketarik eginez:

$$\omega dt + \beta dx = 0 \quad \Rightarrow \quad \frac{dt}{dx} = \frac{\omega}{\beta} = V_f = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1}$$

Eta hortik *fase-abiadura* definitzen da:

$$V_f = \frac{\omega}{\beta}$$

Kontuan eduki behar da garraio-lineatik hedatzen den uhin baten abiadura oso handia izan arren, hedapen-abiadura hori finitua dela. Aireko lineen luzerak 500 km baino handiagoak direnean edo lur azpiko lineen kasuan 250 km baino handiagoak direnean, hedapen-abiadura finitu horrek nabarmen asalda ditzake energiaren garraioa eta mutur hartzaileko kargak.

Demagun 1.500 km-ko luzeradun aireko linea bat dugula. Honako hau izango da mutur igorletik mutur hartzailearaino bidaiatzeko behar den denbora:

$$t = \frac{1.500 \text{ km}}{300.000 \frac{\text{km}}{\text{s}}} = 10 \text{ ms}$$

Denbora hori 50 Hz-tan lan egiten duen sistema baten erdi-periodoaren berdina da ($T=20$ ms). Beraz, linearen mutur hartzailean tentsioak mutur igorlearekiko 180° -ko desfasea edukiko du.

Bi muturren arteko tentsioen desfasea 90° -ra iristen bada edo balio hori gainditzen bada, orduan, erresonantziak sorturiko gaintentsio arriskutsuak ager daitezke.

Galerarik gabeko garraio-linea batean, hedapen-abiaduraren adierazpena sinplifikatu egiten da:

$$V_f = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}} = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \cdot \mu_r} \cdot \sqrt{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r}} \left\{ \begin{array}{l} \mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-4} \frac{\text{Henry}}{\text{km}} \\ \epsilon_0 = \frac{1}{36 \cdot \pi} \cdot 10^{-6} \frac{\text{Faraday}}{\text{km}} \end{array} \right. \Rightarrow V_f = \frac{300.000}{\sqrt{\mu_r \cdot \epsilon_r}}$$

Iragazkortasun erlatiboari dagokionez, material ferromagnetikoez eragin handirik ez dutenez ez aireko lineetan ez lur azpiko lineetan, $\mu_r=1$ dela jo daiteke.

Permitibitate erlatiboari dagokionez, aireko lineen kasuan $\epsilon_r=1$ dela jo daiteke eta, lur azpiko lineen kasurako, kableen geruza isolatzailearen menpekota izango da; bere ohiko balioak 2,5en eta 8ren artekoak dira. Balio horiekin, honako emaitza hauek lortzen dira:

$$V_f = 300 \frac{\text{m}}{\mu\text{s}} \quad \text{Aireko lineentzat}$$

$$V_f = 106 - 190 \frac{\text{m}}{\mu\text{s}} \quad \text{Lur azpiko lineentzat}$$

3.2.3.9 Uhin-luzera edo espazio-periodoa

β eta ω magnitudeekin hedapen-abiadura kalkula daiteke, eta, horrela, aukera ematen da fasea espazioarekiko nola aldatzen den adierazteko.

Uhin bidaiariaren beste ezaugarri garrantzitsu bat bere *denborazko periodoa* (τ) da, eta, denboran harmonikoa den uhin baten kasurako, honako adierazpen honekin definitzen da:

$$\tau = \frac{2\pi}{\omega}$$

Eta espazio-periodoa edo uhin-luzera (λ) da linea batean 360° -ko desfasea duten bi punturen arteko distantzia:

$$\lambda = \frac{2\pi}{\beta}$$

Galerarik gabeko linea baten kasuan, uhin-luzeraren adierazpena nabarmenki sinplifikatzen da:

$$\lambda = \frac{2\pi}{\omega\sqrt{LC}}$$

Aurreko adierazpena aztertuz, linearen maiztasuna handitzen denean uhin-luzera txikitu egiten dela ikusten da.

Ondoren, kasu partikular batzuk aztertuko ditugu:

- Linearen luzera uhin-luzeraren laurdena denean:

Egoera horretan, *linearen maiztasun oszilatzailea* definitzen da:

$$f = \frac{1}{4L\sqrt{LC}}$$

Linearen maiztasun oszilatzaileak adierazten du lineak uhin-luzeraren laurden batekin era askean oszilatzen duela, linearen mutur igorlea deskonektatzen denean eta hartzailea lurrera konektatzen denean.

Maiztasun oszilatzaile horrek funtzio garrantzitsua betetzen du etengailu automatikoen berreskurapen-tentsioaren kalkuluan.

- Linearen luzera uhin-luzeraren erdia denean:

Kasu horretan, linearen bi muturrak lurrera konektatzerakoan lortzen den uhin geldikorrek oszilazio askea izango du.

Hedapen-abiadura eta uhin-luzera maiztasunaren bidez erlazionatzen dira:

$$V_f = f\lambda$$

3.2.3.10 Potentzia naturala edo SIL (*surge impedance loading*)

Garraio-linearen mutur hartzailean inpedantzia adierazgarriaren (Z_0) ezberdina den karga bat dagoenean, uhin islatuak agertzen dira. Uhin horiek beharizanik gabe gainkargatzen dute linea, eta handitu egiten dituzte linearen galerak.

Hori dela eta, uhin islatuak ezabatzeko, komenigarria da mutur hartzailean linearen inpedantzia adierazgarriaren adinako karga instalatzea.

$$\frac{V_r}{I_r} = Z_{LOAD} = Z_0$$

Baldintza horrekin, nabarmenki sinplifikatzen dira tentsioaren eta intentsitatearen adierazpenak:

$$\begin{cases} V(x,t) = |A_1| \text{sen}(\omega t - \beta x) \\ I(x,t) = \frac{|A_1|}{Z_0} \text{sen}(\omega t - \beta x) \end{cases}$$

Aurreko adierazpenetan argi ikusten da kasu horretan uhin erasotzaile ez-indargetuak bakarrik agertzen direla.

Mutur hartzaileko karga aldatzen bada, linearen inpedantzia adierazgarriaren eta kargaren inpedantziaren arteko ezberdintasuna handiagoa den heinean, garrantzi handiagoa hartuko dute sisteman agertuko diren uhin geldikorrek.

Aldiz, inpedantzia biak berdinak direnean, orduan, linea zeharkatzen duen intentsitatea linearen *intentsitate naturala* ($I_{natural}$) izango da:

$$I_r = \frac{V_r}{Z_{LOAD}} = \frac{V_r}{Z_0} = I_{natural}$$

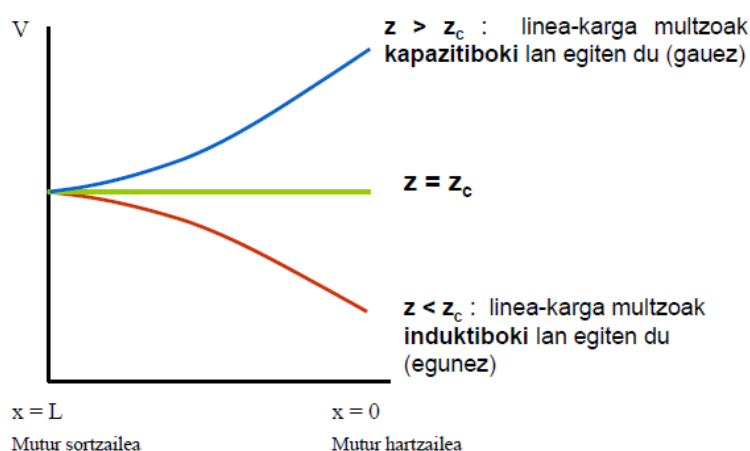
Eta honako adierazpen honek emango du lineatik garraia daitekeen potentzia naturala:

$$P_{natural} = \frac{V_r^2}{Z_0}$$

Aurreko baldintzetan, V_r/I_r erlazioa konstantea izango da linea osoan zehar, eta bere balioa $V(x,t)/I(x,t)=Z_0$ izango da.

Linea infinituki luzea izango da ez direlako uhin islatuak agertuko; eta $V(x,t)$ -ren eta $I(x,t)$ -ren arteko desfasea konstante mantenduko da linearen puntu guztietan.

Lineak garraiatzen duen potentzia, P_r , linearen potentzia naturala baino handiagoa bada, orduan, linearen portaera karga inductibo batena izango da. Aurkako kasuan, bere portaera karga kapazitibo batena izango da.



Garraio-linea erreletan kargen izaera aldakorra da; horren ondorioz, kargen inpedantzia etengabe aldatu egiten da, eta ezinezko gertatzen da lineak beren inpedantzia adierazgarriarekin lan egitea. Hori dela eta, garraio-lineen kargen konpentsazioa gertatzen da, inductantziak eta kondentsadore-bateriak konektatuz eta deskonektatuz lineen muturretan, edo FACTS motako sistemak erabiliz; adibidez, SVCak (*Static VAR Compensator*).

Potentzia naturalak tentsio-maila ezberdineko lineetan garraia daitekeen potentziaren balioespena egiten du. Honako taula honetan, lineen inpedantzia adierazgarrien ohiko balio batzuetatik abiatuta, tentsio-maila ezberdinekin garraia daitekeen potentzia ikus daiteke:

Garraio-lineen potentzia-ahalmena tentsio-maila ezberdinetarako

Tentsioa (kV)	69	115	230	400	800
Inpedantzia adierazgarria (Ω)	400	375	375	250	260
Potentzia naturala (MVA)	12	35	140	640	2.460

3.2.3.11 Luzera kritikoa

Linea oso luzeen kasuan, lineen mutur hartzaileetan gaintentsio arriskutsuak ager litezke, bereziki, lineen luzera uhin-luzeraren laurdena denean. Luzera horri *luzera kritikoa* deritzo:

$$L_{\text{kritikoa}} = \frac{\lambda}{4} = \frac{\pi}{2 \cdot \beta}$$

Galerarik gabeko lineen kasurako ($\alpha=0$), fase konstantearen adierazpena sinplifikatu egiten da ($\beta=\omega \cdot (L \cdot C)^{1/2}$), eta, orduan, luzera kritikoa honako adierazpen honek ematen du:

$$L_{\text{kritikoa}} = \frac{\pi}{2 \cdot \omega \cdot \sqrt{L \cdot C}}$$

Teorikoki, galerarik gabeko linea batean ez dago uhin bidaiarien indargetzerik, eta, teorikoki, tentsioaren balioa infinitua izango litzateke linearen luzerak luzera kritikoa balioa hartzen duenean. Errealitatean, ordea, galerak ekidin ezinak dira garraio-lineetan.

Aurreko azterketarekin jarraituz, luzera kritikoa garrantzi handia hartzen du, batez ere hutsean lan egiten duten tentsio oso altuko lineen kasuan. Aurreko adierazpenetik abiatuta eragiketarik eginez:

$$L_{\text{kritikoa}}[\text{km}] = \frac{\pi}{2 \cdot \omega \cdot \sqrt{L \cdot C}} = \frac{1}{4 \cdot f \cdot \sqrt{\mu_0 \cdot \mu_r} \cdot \sqrt{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r}} = \frac{3}{4 \cdot f} \cdot \frac{1}{\sqrt{\mu_r \cdot \epsilon_r}} \cdot 10^5$$

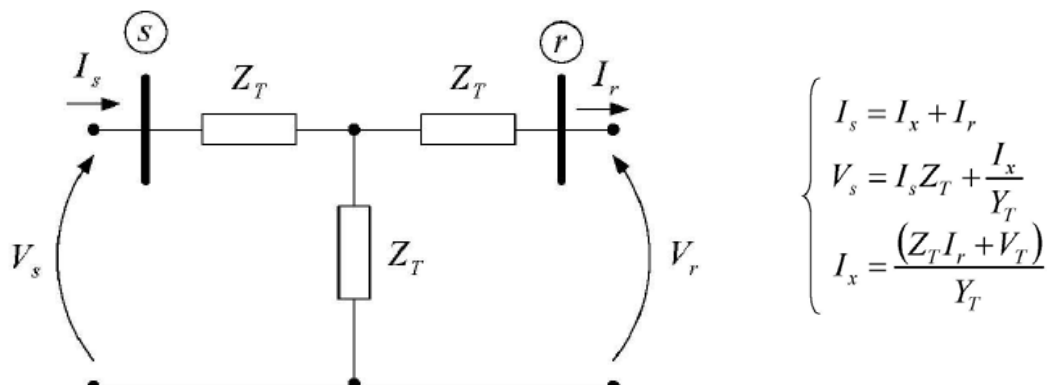
50 Hz-eko maiztasun baten kasurako, aireko lineen kasuan, luzera kritikoa 1.500 km-koa izango da, eta lur azpiko lineen kasuan 530 km eta 949 km artekoa.

3.2.3.12 Linea luzeen T eta Π eredu baliokideak

Nahiz eta garraio-linea luzeen ereduetan definituriko ekuazioekin matematikoki tentsio eta intentsitateen balioak kalkulatzeko aukera izan, zirkuituen ikuspuntutik ez dute balio lineen muturren arteko parametroen arteko erlazioak ikusteko. Hori dela eta, aurreko ekuazioetatik abiatuta zirkuitu edo eredu baliokide batzuk garatu dira. Horien artean erabilienak T eta Π zirkuitu baliokideak dira.

T zirkuitu baliokidea:

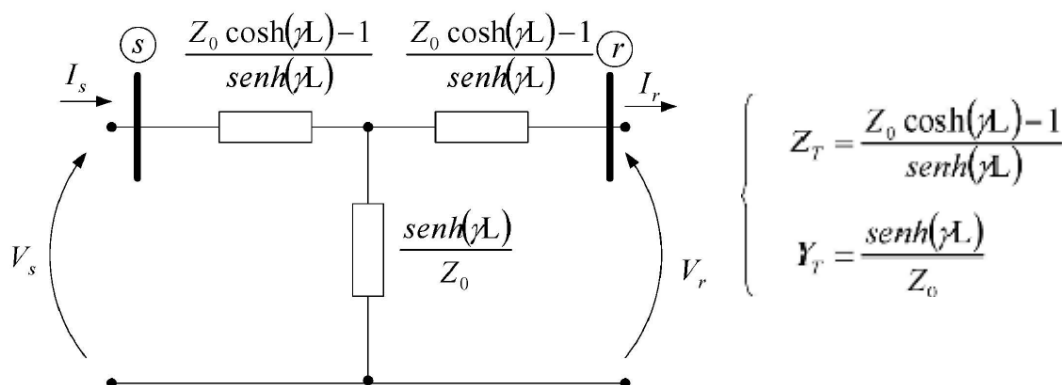
Zirkuitu honetan Kirchoff-en ekuazioak aplikatuz eta erdiko nodoan I_x intentsitatea dagoela jota, honako erlazio hauek ondorioztatzen dira:



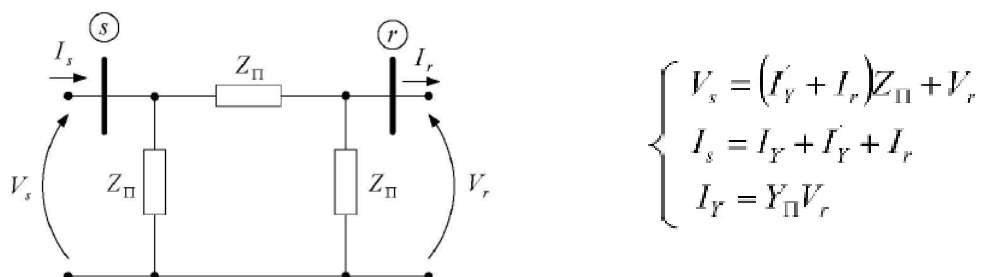
Aurreko adierazpenak landuz, honako adierazpen matritzial hauek ondoriozta daitezke:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} V_s \\ I_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + Z_T Y_T & Z_T(2 + Z_T Y_T) \\ Y_T & 1 + Z_T Y_T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_r \\ I_r \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} V_s \\ I_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma L) & Z_0 \sinh(\gamma L) \\ \frac{\sinh(\gamma L)}{Z_0} & \cosh(\gamma L) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_r \\ I_r \end{bmatrix} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} 1 + Z_T Y_T = \cosh(\gamma L) \\ Z_T(2 + Z_T Y_T) = Z_0 \sinh(\gamma L) \\ Y_T = \frac{\sinh(\gamma L)}{Z_0} \end{cases}$$

Eta horrela, T ereduko Y_T eta Z_T elementuen balioak kalkula daitezke, linearen parametro adierazgarrien funtzioan:

Π zirkuitu baliokidea:

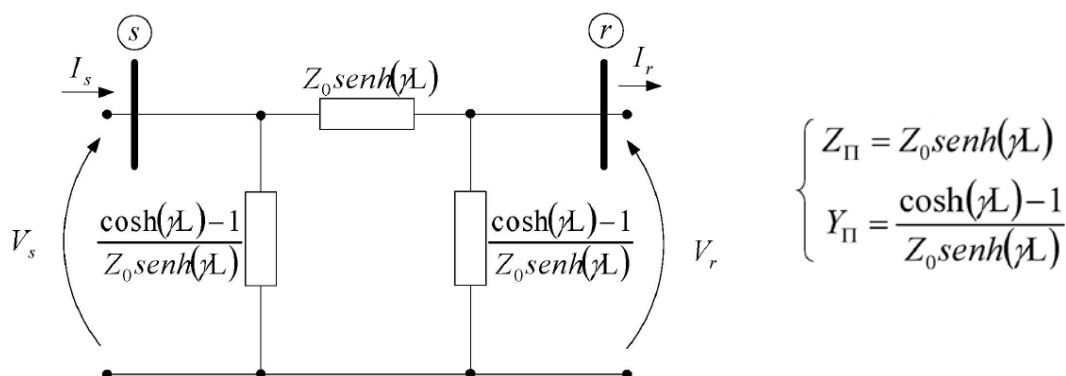
Zirkuitu honetan Kirchoff-en ekuazioak aplikatuz, honako erlazio hauek ondorioztatzen dira:



Aurreko adierazpenak landuz, honako adierazpen matritzial hauek ondoriozta daitezke:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} V_s \\ I_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + Y_{\Pi} Z_{\Pi} & Z_{\Pi} \\ Y_{\Pi} (2 + Z_{\Pi} Y_{\Pi}) & 1 + Y_{\Pi} Z_{\Pi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_r \\ I_r \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} V_s \\ I_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma L) & Z_0 \sinh(\gamma L) \\ \frac{\sinh(\gamma L)}{Z_0} & \cosh(\gamma L) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_r \\ I_r \end{bmatrix} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} 1 + Z_{\Pi} Y_{\Pi} = \cosh(\gamma L) \\ Z_{\Pi} = Z_0 \sinh(\gamma L) \\ Y_{\Pi} (2 + Z_{\Pi} Y_{\Pi}) = \frac{\sinh(\gamma L)}{Z_0} \end{cases}$$

Eta horrela, Π ereduko Y_{Π} eta Z_{Π} elementuen balioak kalkula daitezke, linearen parametro adierazgarrien funtzioan:



Jarraian, Π ereduko parametroekiko interesgarriak diren erlazio matematiko batzuk adieraziko ditugu:

$$\begin{aligned} Z_{\Pi} &= Z_0 \sinh(\gamma L) = \sqrt{\frac{Z}{Y}} \sinh(\gamma L) & Y_{\Pi} &= \frac{\cosh(\gamma L) - 1}{Z_0 \sinh(\gamma L)} \Rightarrow \frac{\cosh(\gamma L) - 1}{\sinh(\gamma L)} = \tanh\left(\frac{\gamma L}{2}\right) \\ Z_{\Pi} &= ZL \frac{\sinh(\gamma L)}{\gamma L} & Y_{\Pi} &= \frac{1}{Y_{LT}} \frac{\tanh\left(\frac{\gamma L}{2}\right)}{\gamma L} \\ Z_{\Pi} &= Z_{LT} \frac{\sinh(\gamma L)}{\gamma L} & Y_{\Pi} &= \frac{1}{Z_0} \tanh\left(\frac{\gamma L}{2}\right) \\ Z_{LT} &= ZL \end{aligned}$$

3.2.3.13 Linea luzeen eredu baliokide hurbilduak

Aurreko atalean adierazitako eredu baliokideekin lan egiterakoan, argumentu konplexudun funtzio hiperbolikoekin egin behar dira eragiketak. Eragiketa horiekin lan egitea ekiditeko, eredu baliokide hurbilduak garatu ziren.

Funtzio hiperbolikoen McLaurin-en serie-garapena eginez:

$$\begin{aligned} \cosh(\theta) &= 1 + \frac{\theta^2}{2!} + \frac{\theta^4}{4!} + \frac{\theta^6}{6!} + \dots & \cosh(\gamma L) &\approx 1 + \frac{(\gamma L)^2}{2} \\ \sinh(\theta) &= \theta + \frac{\theta^3}{3!} + \frac{\theta^5}{5!} + \frac{\theta^7}{7!} + \dots & \sinh(\gamma L) &\approx \gamma L \end{aligned}$$

Aurreko hurbilketa horiek T eta π eredu baliokideen elementuetan ordezkatzuz:

$$\left\{ \begin{array}{l} Z_T = \frac{Z_0 \cosh(\gamma L) - 1}{\sinh(\gamma L)} = \frac{Z_L}{2} \\ Y_T = \frac{\sinh(\gamma L)}{Z_0} = Y_L \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} Z_{\pi} = Z_0 \sinh(\gamma L) = Z_L \\ Y_{\pi} = \frac{Z_0 \cosh(\gamma L) - 1}{\sinh(\gamma L)} = \frac{Y_L}{2} \end{array} \right.$$

Nahiz eta eredu hurbildu horietan zehaztasuna galdu, linearen Z eta Y parametroen kalkuluan erroreak egiten direnez, eredu hurbilduen erabilerak ez du emaitzetan eragin adierazgarririk izango. Z eta Y parametroen kalkuluan egiten diren erroreak, besteak beste, honako hauek dira:

- Eroaleak lurrazalarekiko guztiz horizontal mantentzen direla uste izatea.
- Lineak guztiz transposizioak daudela uste izatea.
- Eroaleen arteko distantzia linea osoan zehar konstante mantentzen dela jotzea.

4 ANPAZITATEAREN KALKULUA

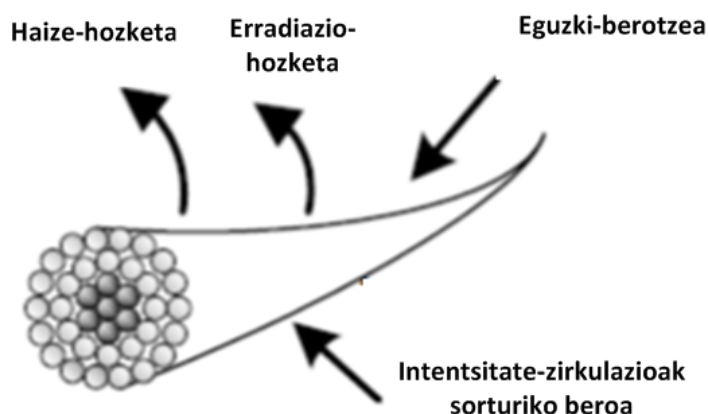
4.1 Sarrera

Aireko linea baten anpazitatearen kalkuluaren helburua da, irizpide termikoaren ikuspuntutik, linea horren eroaleak garraia dezakeen intentsitate maximoa jakitea. Eroale bat zeharkatzen duen intentsitateak eroalearen temperatura handituko du, intentsitate-zirkulazio horrek sortzen dituen Jouleren galerak direla eta.

Anpazitatearen kalkulua honako arrazoi hauengatik egin behar da:

- Suberaketa ekiditeko. Aluminioaren suberaketa 95 °C-tik gora gertatzen da. Suberaketaren ondorioz, aluminioak erresistentzia mekanikoa galduko luke.
- Lurzoruarekiko segurtasun-tartea mantentzeko. Eroaletik doan intentsitateak eroalearen temperatura handitzen du; horren ondorioz, eroalearen gezia handitu egiten da eta lurzoruarekiko distantzia txikitu. Distantzia hori araudietan definituriko segurtasun-tartea baino handiagoa izan dadin bermatu behar da linearen operazio-baldintza guztietan.
- Burdineriaren propietate mekanikoak mantentzeko. Eroale eta isolagailuen artean tartekatzen diren burdineria-elementuak gehiegi berotu daitezke eta, horren ondorioz, propietate mekanikoak gal ditzake.

Anpazitatearen kalkuluan, honako bero-transferentzia honen ebazpena egiten da:



Sartzen den beroa = Irteten den beroa

$$Q_{\text{eguzki}} + I^2 \cdot R = Q_{\text{konbektzioa}} + Q_{\text{erradiazioa}} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow I = \sqrt{\frac{Q_{\text{konbektzioa}} + Q_{\text{erradiazioa}} - Q_{\text{eguzki}}}{R}}$$

Aurreko ekuazioaren ebazpenean, eragin zuzena daukate bai materialen temperatura maximo onargarriek bai baldintza atmosferikoek (adibidez, giro-tenperaturak, eguzki-erradiazioak eta haizearen abiadurak).

Jarraian, Estatuan indarrean dagoen araudiak anpazitatearen kalkulari buruz esaten duena aztertuko dugu eta, gero, planteatu berri den bero-transferentzia ekuazioarekin alderatuko dugu.

4.2 Goi Tentsioko Lineen Arautegiak dioena

Estatuko Goi Tentsioko Lineen Arautegiaren arabera, aireko lineen intentsitate maximo onargarriak kalkulatzeko bi aukera ematen ditu:

4.2.1 Intentsitate-dentsitatea erabiliz

Erregimen iraunkorrean linea zeharkatzen duen intentsitate-dentsitatea honako taula honetan adierazitako balioen azpitik mantendu beharko da:

Sekzio izendatua [mm ²]	Intentsitate-dentsitatea [A/mm ²]		
	Kobrea	Aluminioa	Aluminiozko aleazioa
10	8,75		
16	7,60	6,00	5,60
25	6,35	5,00	4,65
35	5,75	4,55	4,25
50	5,10	4,00	3,70
70	4,50	3,55	3,30
95	4,05	3,20	3,00
125	3,70	2,90	2,70
160	3,40	2,70	2,50
200	3,20	2,50	2,30
250	2,90	2,30	2,15
300	2,75	2,15	2,00
400	2,50	1,95	1,80
500	2,30	1,80	1,70
600	2,10	1,65	1,55

Taulako balioak, 20 °C-tan, honako erresistibitate hauek dituzten materialetan oinarritzen dira: kobrea 0,017241 Ω·mm²/m, aluminioa 0,028264 Ω·mm²/m, aluminiozko aleazioa 0,03250 Ω·mm²/m. Altzairu galbanizatuarentzat 0,192 Ω·mm²/m-ko balioa erabil daiteke, eta aluminioz estalitako altzairuarentzat 0,0848 Ω·mm²/m-koa.

ACSR motako eroale konposatuen kalkulua egiteko, eroalearen sekzio osoa aluminioa dela joko da eta, jarraian, haren konposaketaren arabera murrizketa-koefiziente hau aplikatuko zaio: 0,916 30+7 konposaketarentzat; 0,937 6+1 eta 26+7 konposaketarentzat; 0,95 54+7 konposaketarentzat; eta 0,97 45+7 konposaketarentzat.

Aluminiozko aleazioa eta altzairuzko konposaketa duten eroaleekin ACSR motako eroaleetan jarraitutako prozedura bera erabiliko da; bestelako konposaketa duten eroaleen kasuan, aurreko taulan kobrearentzat adierazitako balioak erabiliko dira, eta honako zuzenketa-faktore hau aplikatuko zaie:

$$\sqrt{\frac{1,724}{\rho_{\text{materiala}} \left[\frac{\mu\Omega}{\text{mm}^2} \right]}}$$

OHARRA: IEC eta EN arauetan argitaratutako bestelako intentsitate-dentsitate gaurkotuagoak erabiltzea onartzen da.

4.2.2 Intentsitate maximo onargarriak

Aurreko atalean lorturiko balioen ezberdinak onartuko dira, linearen karga-egoera eta baldintza meteorologikoak kontuan hartuz eroaleek hartzen duten temperaturaren analisiak egiten badira. Kalkulu hori indarrean dauden arauak jarraituz egin beharko da.

4.2.3 Oharrak

Ez Arautegiak ezta Arautegiak aipatzen dituen arauak ere ez dute inolako informaziorik ematen aurreko taula horretako datuen jatorriaz. Ez dago jakiterik eroaleen zein lan-tenperatura maximoentzat kalkulatu diren, ezta zein baldintza klimatologiko erabiliz kalkulatu diren ere. Horren ildotik, araudiak esaten du aireko lineak 50 °C-ko tenperatura maximatorako diseinatu behar direla, kategoria bereziko lineak salbu; azken horietan erabili beharreko diseinu-tenperatu maximoa 85 °C-koa izan beharko da.

Bestalde, Arautegiak, kalkulu zorrotzagoa egiteko aukera ematerakoan, «indarrean dagoen arauak erabiliz» esaten du; baina Arautegiaren barnean aplikagarriak diren arauen zerrenda ematen duenean, zerrenda horretan ez dago kalkulu hori egiteko metodorik deskribatzen duen araurik.

4.3 REEren Operazio Prozedurek diotena

REEren 13.1 Operazio Prozedurak garraio-sareko linea berrien diseinuan jarraitu behar diren irizpideak finkatzen ditu:

- 220 kV-eko lineak: zirkuitu bikoitza, Gull-duplex eroalea erabilia, 85 °C-ko lan-tenperatura maximoarentzat eta 2.000 A-ko intentsitate izendatua duen tresneriarekin.

- 400 kV-eko lineak: zirkuitu bikoitza, Condor-triplex eroalea erabilia, 85 °C-ko lan-tenperatura maximoarentzat eta 2.500 A-ko intentsitate izendatua duen tresneriarekin.

Segurtasun-tarteei dagokienez, geziak kalkulu bidez lortutakoak baino 1 m handiagoak direla jo beharko da.

Eta lineen ezaugarriei dagokienez, 10 °C-ko segurtasun-koefiziente hau aplikatuz lortu diren balioak erabili beharko dira:

	220 kV-eko linea normalizatua	400 kV-eko linea normalizatua
Sekuentzia zuzeneko parametroak		
R ₁ [pu/100 km]	0,00956	0,00161
X ₁ [pu/100 km]	0,06518	0,01729
B ₁ [pu/100 km]	0,17790	0,66554
Sekuentzia homopolarreko parametroak		
R ₀ [pu/100 km]	0,06475	0,01738
X ₀ [pu/100 km]	0,18482	0,05525
B ₀ [pu/100 km]	0,10059	0,35364
Garraio-ahalmena [MVA] giro-tenperatura ezberdinentzat		
5 °C	780	2.030
10 °C	750	1.990
15 °C	710	1.950
20 °C	680	1.900
25 °C	640	1.860
30 °C	600	1.820
35 °C	560	1.700

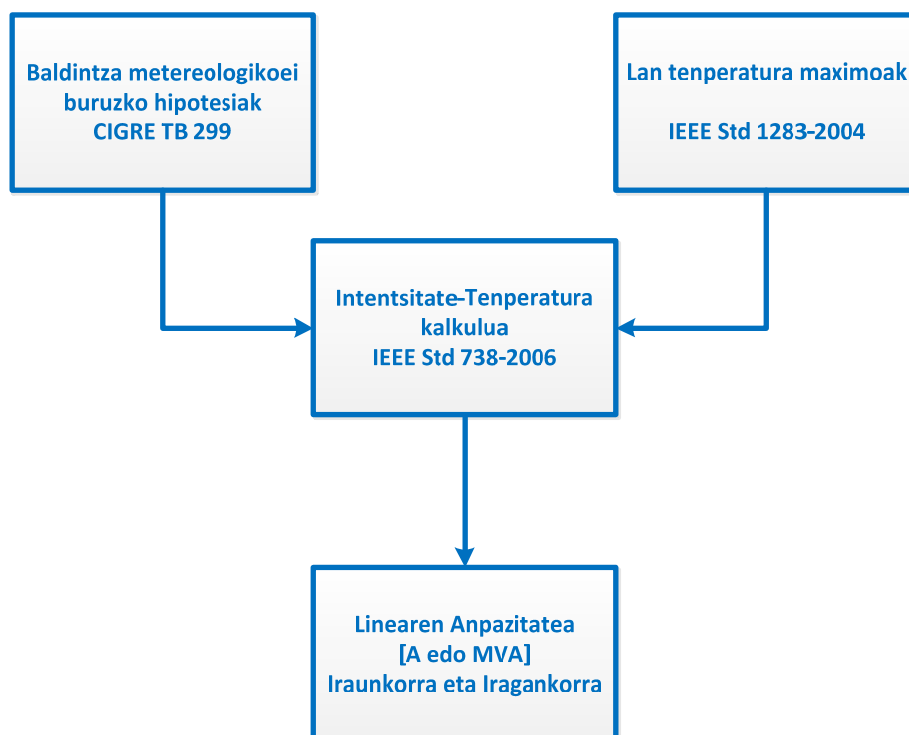
Aurreko taulan ikus daiteke REEk kontuan izan duela lineen anpazitatearen kalkuluan giro-tenperaturaren eragina, baina, berriz ere, ez dago beste baldintza meteorologikoei buruzko informaziorik.

4.4 IEEE eta CIGRE erakundeek diotena

IEEEk eta CIGREk elkarrekin lan egin dute aireko lineen anpazitatearen kalkulu analitikoa egiteko prozedura bat definitzeko. Prozedura horren bitartez, linea baten anpazitatea defini daiteke edozein baldintza meteorologikorentzat. Gainera, erregimen iraunkorreko

anpazitateaz gainera, garatutako metodoak aukera ematen du erregimen iragankorreko anpazitateak kalkulatzeko.

Prozedurak jarraian adierazitako diagrama jarraitzen du:



Prozedura horretan, sarrerako datuak dira baldintza metereologikoak eta aireko linea osatuko duten elementuen lan-temperatura maximo onargarriak. Dena den, linea bat diseinatzerakoan, askotan zaila izaten denez lineak zeharkatuko duen inguruneko baldintza metereologikoak jakitea, prozedurak baldintza metereologiko kontserbatzaileak definitu ditu.

Jarraian, prozedura osatzen duten zati garrantzitsuenak deskribatuko ditugu.

4.4.1 IEEE Std 738-2006

Arau hau guztiz analitiko da. Baldintza metereologiko jakin batzuetarako, eroalearen temperatura eroalea zeharkatzen duen intentsitatearekin erlazionatzeko adierazpen matematikoak ematen ditu.

Estatu Batuetako konpainia elektriko gehienek erabiltzen duten metodoa da, bai erregimen iraunkorreko bai iragankorreko anpazitateak kalkulatzeko, baina ez du ematen inolako gomendiorik erabili beharreko baldintza metereologikoen hipotesiei buruz.

Ebatzi beharreko bero-balantzeari buruz, honako ezaugarri hauek azpimarra daitezke:

- Konbekzioz galtzen den beroa

Nagusiki, haizearen abiaduraren, haizearen noranzkoaren eta giro-tenperaturarekiko eroaleak duen gaintemperaturaren menpekoa da.

Badaude eragin txikiagoa duten bestelako faktore batzuk: eroalearen diametroa, airearen biskositatea, airearen dentsitatea eta airearen eroankortasun termikoa.

Normalean, erradiazioz galtzen den beroa baino 3 edo 4 aldiz gehiago galtzen da konbekzioz.

- Eguzki-erradiazioz irabazten den beroa

Normalean, eguzki-erradiazioak 5 °C eta 10 °C artean igotzen du eroalearen tenperatura giro-tenperaturarekiko. Kasurik txarrean, tenperatura-igoera 20 °C-koa izatera irits daiteke.

Bere balioa kalkulatzeko kontuan izan beharreko parametroak dira eguzkiaren kokapena (eguneko ordua, urteko eguna eta latitudea), eroalearen orientazioa, gorapen-angelua eta eroalearen absortibitatea.

4.4.2 CIGRE TB 299

CIGRE erakundeak prestatuturiko txosten honen izenburua da «Aireko eroale biluzientzat erabili beharreko baldintza meteorologikoen aukeraketarako gida». Bere helburua da lineen egoera iraunkorreko eta iragankorreko anpazitateak kalkulatzeko orduan erabili beharreko baldintza meteorologiko egokiak definitzea.

Txostenak lau egoera bereizten ditu:

- Oinarrizko balioak: faktore murriztatzaileena lineen gezia denean erabiltzeko balioak finkatzen ditu:
 - Haizearen abiadura: 0,6 m/s
 - Giro-tenperatura: urteko maximoa
 - Eguzki-erradiazioa: 1000 W/m².
 - Absortibitatea: 0,8
 - Emisibitatea: 0,1 absortibitatearen azpitik.

Hipotesi horiekin % 1 eta % 2 arteko arriskua hartzen dela jotzen da.

- Baldintza meteorologikoen ikasketak: lineak zeharkatuko duen ingurunean, baldintza meteorologikoen neurketa egiteko prozedura adierazten du.
- Egunez eta gauzez erabilgarriak diren anpazitate-balio ezberdinak
- Denbora errealeko anpazitatea

GOI-TENTSIOKO LUR AZPIKO LINEAK

1 SARRERA

Aireko lineekin alderatuta, lur azpiko lineen ezberdintasun nagusia da lur azpiko lineak kablez osaturik daudela, hots, eroaleez gainera beste hainbat geruza dituztela funtzio ezberdinak betetzeko; garrantzitsuena geruza isolatzailea da, pertsonak eroaleekin kontaktuan jar ez gaitezen ekiditeko.

2 PARAMETRO ELEKTRIKOAK

2.1 Luzetarako parametro elektrikoak

2.1.1 Erresistentzia R [Ω]

Aireko lineetan gertatzen ez den bezala, lur azpiko kableen kasuan, fabrikatzaileen katalogoetan erresistentziaren balioak ematen dira 50 Hz-eko maiztasunerako eta lan-tenperatura maximorako. Beraz, ez dago korrante alternoko erresistentziaren baliorik kalkulatu beharrik korrante zuzeneko erresistentziatik abiatuta.

2.1.2 Induktantzia L [H]

Lur azpiko lineen kasuan, induktantziaren balioa aireko lineena baino nabarmen txikiagoa da, faseen arteko distantziak txikiagoak direnez, GMDren balioa txikiagoa izango delako.

$$L_k \left[\frac{H}{km} \right] = 2 \cdot 10^{-4} \cdot \ln \frac{GMD}{GMR}$$

2.2 Zeharkako parametro elektrikoak

2.2.1 Kapazitatea C [F]

Kableen kasuan, eroaleaz gainera bestelako geruzak ere badaudenez, kapazitatearen balioa aireko lineetan baino nabarmen handiagoa da. Banakako pantailadun hiru poloko kableen edo kable polobakarren kasuan, honako adierazpen honekin kalkulatzen da:

$$C_k \left[\frac{F}{km} \right] = \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon}{\ln \frac{R_2}{R_1}}$$

Non:

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$$

Materialaren permitibitate elektrikoa

$$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-9} \text{ [F/km]} \quad \text{Hutsaren permitibitate elektrikoa}$$

ϵ_r

Permitibitate erlatiboa,

PVC $\epsilon_r = 8$

EPR $\epsilon_r = 3$

XLPE $\epsilon_r = 2,5$

R_2 [m] Zentrotik geruza isolatzailerainoko distantzia

R_1 [m] Zentrotik barne-geruza erdieroalerainoko distantzia

2.2.2 Konduktantzia G (S)

Konduktantzia da material batek korrante elektrikoaren zirkulazioa errazteko duen propietatea; hots, erresistentziaren alderantzikoa da. Konduktantzia adierazteko aukeretako bat hau da:

$$G_k (faseko) \left[\frac{S}{km} \right] = \omega \cdot C \cdot \text{tg} \delta \quad \text{Non tg} \delta:$$

PVC $\text{tg} \delta = 0,1$

EPR $\text{tg} \delta = 0,04$

XLPE $\text{tg} \delta = 0,008$

3 ANPAZITATEA

Lur azpiko kableen anpazitatea kalkulatzeko, gaur egun, bi aukera nagusi daude:

- Arautegian emandako taulak erabiltzea.

Goi Tentsioko Lineen Arautegiak taula ugari ematen ditu, kasurik ohikoenetan, 30 kV arteko tentsioko kableen anpazitatea kalkulatu ahal izateko. Taulez gainera, hainbat zuzenketa-faktore ere adierazten ditu.

Arautegiko taulak arau ezberdineko taulekin eta fabrikatzaileek ematen dituzten taulekin konbina daitezke.

- Aireko lineetarako garatu diren prozedurak bezalako prozedura analitikoak erabiltzea.

IEC mailan IEC 60287 arau multzoak eta UNE arauetan 21144 zenbakiarekin kodetuak definitzen dute erabil daitezkeen prozedura analitikoak. Aireko lineen kasuan ez bezala, lur azpiko lineetan gerta daitezkeen instalazio-baldintzak ugariak direnez, prozedura analitiko horren konplexutasuna nabarmen handiagoa da eta, gehienetan, ez dira eskura egoten kalkuluak egiteko beharrezko parametro guztiak.

Atal honetan, lurazpiko lineen anpazitatearen kalkulua taulen bidez egiteko aukera garatuko da, Arautegiko taulak UNE 211435:2011 arauarekin eta FACEL (Espainiako kable-fabrikatzaileen elkarte) elkarteak argitaratutako taulekin konbinatuz. Jarraian adieraziko den metodoa baliagarria da 30 kV arteko tentsioentzat.

3.1 Intentsitate maximo onargarriak

Tauletan agertzen diren intentsitate maximo onargarrien balioak baliagarriak dira honako instalazio baldintza hauetarako:

Aireko giro-tenperatura:	40 °C
Lurzoruko tenperatura:	25 °C
Linearen sakonera:	1 m
Lurzoruaeren erresistibitate termikoa:	1,5 K·m/W
Zirkuituen elkarketa:	Zirkuitu trifasiko bakarra, beste bero-iturririk gabe
Eguzki-erradiazioa:	Eguzkitik babestuak

Honako hauek dira kableen lan-tenperatura maximoak:

Isolatzaila mota	Baldintzak	
	Erregimen iraunkorra	Zirkuitulaburra (t ≤ 5 s)
EPR	90	250
XLPE	90	250
HEPR	105	250

1. taula. Kobrezko eroaledun kable polobakarrak

Sekzioa mm ²	Isolatzailea								
	EPR			XLPE			HEPR		
	Zuzenean lurperatuta	Hodi barnean lurperatuta	Airean, eguzkitik babestuta	Zuzenean lurperatuta	Hodi barnean lurperatuta	Airean, eguzkitik babestuta	Zuzenean lurperatuta	Hodi barnean lurperatuta	Airean, eguzkitik babestuta
16	96	90	105	100	94	115	105	98	120
25	125	115	140	130	120	155	135	125	160
35	145	135	170	155	145	185	160	150	195
50	175	160	205	180	170	220	190	180	230
70	215	200	255	225	205	275	235	220	295
95	255	235	310	265	245	335	280	260	355
120	290	270	355	300	280	385	320	295	410
150	325	305	405	340	315	435	360	330	465
185	370	345	465	380	355	500	405	375	535
240	425	400	550	440	415	590	470	440	630
300	480	450	635	495	465	680	530	500	725
400	545	510	740	560	525	790	600	565	840
500	620	590	870	635	605	930	680	650	975
630	695	660	1025	715	675	1095	765	730	1125

2. taula. Aluminiozko eroaledun kable polobakarrak

Sekzioa mm ²	Isolatzailea								
	EPR			XLPE			HEPR		
	Zuzenean lurperatuta	Hodi barnean lurperatuta	Airean, eguzkitik babestuta	Zuzenean lurperatuta	Hodi barnean lurperatuta	Airean, eguzkitik babestuta	Zuzenean lurperatuta	Hodi barnean lurperatuta	Airean, eguzkitik babestuta
16	74	70	84	78	74	92	82	76	96
25	96	90	110	100	94	120	105	98	125
35	115	105	130	120	110	145	125	115	150
50	135	125	155	140	130	170	145	135	180
70	165	155	195	170	160	210	180	170	225
95	200	185	240	205	190	255	215	200	275
120	225	210	275	235	215	295	245	230	320
150	255	235	315	260	245	335	275	255	360
185	285	270	360	295	280	385	315	290	415
240	335	310	425	345	320	455	365	345	495
300	375	355	490	390	365	525	410	390	565
400	430	405	570	445	415	610	470	450	660
500	495	465	670	505	480	715	540	515	775
630	565	530	780	575	545	830	615	590	905

3. taula. Kobrezko eroaledun kable polobakar armatuak

Sekzioa mm ²	Isolatzailea								
	EPR			XLPE			HEPR		
	Zuzenean lurperatuta	Hodi barnean lurperatuta	Airean, eguzkitik babestuta	Zuzenean lurperatuta	Hodi barnean lurperatuta	Airean, eguzkitik babestuta	Zuzenean lurperatuta	Hodi barnean lurperatuta	Airean, eguzkitik babestuta
16	98	90	105	100	94	115	105	98	120
25	125	115	135	130	120	150	135	125	155
35	150	135	165	155	140	180	160	145	190
50	175	160	195	180	165	210	190	175	225
70	215	195	245	225	200	265	235	215	280
95	255	230	295	260	235	315	275	250	335
120	285	260	340	295	265	360	310	285	385
150	315	290	380	325	295	405	345	315	435
185	350	320	435	360	330	460	385	355	495
240	400	365	505	410	375	530	435	400	575
300	440	400	570	450	410	600	480	445	650
400	485	445	650	495	450	680	530	490	745
500	535	495	745	540	505	775	585	545	855
630	580	535	850	585	545	885	635	595	975

4. taula. Aluminiozko eroaledun kable polobakar armatuak

Sekzioa mm ²	Isolatzailea								
	EPR			XLPE			HEPR		
	Zuzenean lurperatuta	Hodi barnean lurperatuta	Airean, eguzkitik babestuta	Zuzenean lurperatuta	Hodi barnean lurperatuta	Airean, eguzkitik babestuta	Zuzenean lurperatuta	Hodi barnean lurperatuta	Airean, eguzkitik babestuta
16	76	68	82	80	72	88	80	76	90
25	98	88	105	100	92	110	105	95	115
35	115	105	130	120	110	135	125	115	140
50	135	125	155	140	130	160	150	135	170
70	165	150	190	175	155	200	180	165	210
95	200	180	230	205	185	240	215	195	255
120	225	205	265	230	210	275	245	220	295
150	250	230	300	255	235	310	270	250	330
185	280	255	345	290	265	355	305	280	380
240	320	295	400	330	300	415	350	325	445
300	360	325	455	365	335	470	390	360	505
400	400	365	525	410	375	540	440	405	585
500	450	415	605	455	425	620	490	460	675
630	495	460	700	505	470	710	545	510	775

5. taula. Kobrezko eroaledun hiru poloko kableak

Sekzioa mm ²	Isolatzailea								
	EPR			XLPE			HEPR		
	Zuzenean lurperatuta	Hodi barnean lurperatuta	Airean, eguzkitik babestuta	Zuzenean lurperatuta	Hodi barnean lurperatuta	Airean, eguzkitik babestuta	Zuzenean lurperatuta	Hodi barnean lurperatuta	Airean, eguzkitik babestuta
16	94	86	100	98	90	105	102	94	110
25	120	110	130	125	115	140	130	120	145
35	145	130	155	150	140	170	155	145	180
50	170	155	190	175	160	205	185	170	215
70	210	195	235	220	200	255	225	210	265
95	250	230	285	260	235	305	265	250	320
120	280	260	325	290	265	345	305	285	365
150	315	290	370	325	300	395	340	315	415
185	355	325	420	370	335	445	385	355	475
240	415	385	495	425	395	525	445	420	555
300	465	430	565	475	445	600	500	470	635

6. taula. Aluminiozko eroaledun hiru poloko kableak

Sekzioa mm ²	Isolatzailea								
	EPR			XLPE			HEPR		
	Zuzenean lurperatuta	Hodi barnean lurperatuta	Airean, eguzkitik babestuta	Zuzenean lurperatuta	Hodi barnean lurperatuta	Airean, eguzkitik babestuta	Zuzenean lurperatuta	Hodi barnean lurperatuta	Airean, eguzkitik babestuta
16	72	66	75	76	70	80	78	72	85
25	90	85	100	95	90	110	100	95	110
35	110	100	120	115	105	130	120	110	135
50	130	120	145	135	125	155	145	130	165
70	160	150	180	165	155	195	170	160	200
95	190	175	220	200	180	235	205	190	240
120	220	200	250	225	205	270	235	215	280
150	245	225	285	255	230	305	265	240	315
185	275	255	325	285	260	345	295	275	360
240	320	300	380	330	305	405	345	325	425
300	360	335	435	375	345	465	390	365	485

7. taula. Kobrezko eroaledun hiru poloko kable armatuak

Sekzioa mm ²	Isolatzailea								
	EPR			XLPE			HEPR		
	Zuzenean lurperatuta	Hodi barnean lurperatuta	Airean, eguzkitik babestuta	Zuzenean lurperatuta	Hodi barnean lurperatuta	Airean, eguzkitik babestuta	Zuzenean lurperatuta	Hodi barnean lurperatuta	Airean, eguzkitik babestuta
16	92	86	95	100	92	105	100	94	105
25	120	110	125	125	115	140	130	120	140
35	145	130	150	150	140	165	155	145	170
50	170	155	180	180	165	200	185	170	205
70	210	190	225	220	200	250	225	210	255
95	245	230	270	260	235	300	265	245	305
120	280	260	310	295	270	340	300	280	350
150	315	290	350	330	300	385	335	310	395
185	355	325	400	370	340	440	380	350	450
240	410	380	470	425	395	510	440	415	530
300	460	430	530	480	445	580	495	465	605

8. taula. Aluminiozko eroaledun hiru poloko kable armatuak

Sekzioa mm ²	Isolatzailea								
	EPR			XLPE			HEPR		
	Zuzenean lurperatuta	Hodi barnean lurperatuta	Airean, eguzkitik babestuta	Zuzenean lurperatuta	Hodi barnean lurperatuta	Airean, eguzkitik babestuta	Zuzenean lurperatuta	Hodi barnean lurperatuta	Airean, eguzkitik babestuta
16	72	66	75	76	70	80	78	72	80
25	90	85	95	95	90	105	100	90	110
35	110	100	115	115	105	130	120	110	130
50	130	120	140	140	125	155	140	130	160
70	160	145	175	170	150	190	170	160	195
95	190	175	210	200	180	225	205	190	235
120	215	195	240	225	205	260	230	215	270
150	240	220	270	250	230	295	260	240	305
185	270	245	305	285	255	335	290	270	345
240	310	285	355	325	295	390	335	315	405
300	360	330	415	375	345	455	385	360	470

3.2 Zuzenketa-faktoreak

3.2.1 Lur azpiko instalazioak

3.2.1.1 Lurzoruko temperatura 25 °C-koa ez denean (ITC-LAT-06)

Erregimen iraunkorreko temperatura θ_s [°C]	Lurzoruko temperatura, θ_v [°C]								
	10	15	20	25	30	35	40	45	50
105	1,09	1,06	1,03	1,00	0,97	0,94	0,90	0,87	0,83
90	1,11	1,07	1,04	1,00	0,96	0,92	0,88	0,83	0,78
70	1,15	1,11	1,05	1,00	0,94	0,88	0,82	0,75	0,67
65	1,17	1,12	1,06	1,00	0,94	0,87	0,79	0,71	0,61

Taulan agertzen ez diren kasuetarako, honako adierazpen honekin kalkula daiteke zuzenketa-faktorea:

$$F = \sqrt{\frac{\theta_s - \theta_t}{\theta_s - 25}}$$

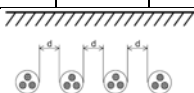
3.2.1.2 Lurzoruaren erresistibitate termikoa 1,5 K·m/W ez denean (ITC-LAT-06)

Instalazio mota	Eroalearen sekzioa mm ²	Lurzoruaren erresistibitate termikoa, K·m/W						
		0,8	0,9	1,0	1,5	2,0	2,5	3
Zuzenean lurperatutako kableak	25	1,25	1,20	1,16	1,00	0,89	0,81	0,75
	35	1,25	1,21	1,16	1,00	0,89	0,81	0,75
	50	1,26	1,21	1,16	1,00	0,89	0,81	0,74
	70	1,27	1,22	1,17	1,00	0,89	0,81	0,74
	95	1,28	1,22	1,18	1,00	0,89	0,80	0,74
	120	1,28	1,22	1,18	1,00	0,88	0,80	0,74
	150	1,28	1,23	1,18	1,00	0,88	0,80	0,74
	185	1,29	1,23	1,18	1,00	0,88	0,80	0,74
	240	1,29	1,23	1,18	1,00	0,88	0,80	0,73
	300	1,30	1,24	1,19	1,00	0,88	0,80	0,73
Hodien barnean lurperatutako kableak	25	1,12	1,10	1,08	1,00	0,93	0,88	0,83
	35	1,13	1,11	1,09	1,00	0,93	0,88	0,83
	50	1,13	1,11	1,09	1,00	0,93	0,87	0,83
	70	1,13	1,11	1,09	1,00	0,93	0,87	0,82
	95	1,14	1,12	1,09	1,00	0,93	0,87	0,82
	120	1,14	1,12	1,10	1,00	0,93	0,87	0,82
	150	1,14	1,12	1,10	1,00	0,93	0,87	0,82
	185	1,14	1,12	1,10	1,00	0,93	0,87	0,82
	240	1,15	1,12	1,10	1,00	0,92	0,86	0,81
	300	1,15	1,13	1,10	1,00	0,92	0,86	0,81
400	1,16	1,13	1,10	1,00	0,92	0,86	0,81	

Lurzoruaren erresistibitate termikoa K-m/W	Lurzoru mota eta hezetasun-maila
0,40	Uretan murgildua
0,50	Oso hezea
0,70	Hezea
0,85	Hezetasun gutxi
1,00	Lehorra
1,20	Buztintsua eta oso lehorra
1,50	Hareatsua eta oso lehorra
2,00	Harri hareatsuak
2,50	Kareharriak
3,00	Harri granitikoak

3.2.1.3 Lurzoruan bildutako hiru poloko kableak edo kable polobakar hirukoteak (ITC-LAT-06)

Instalazio mota	Multzoen arteko banaketa	Zangako multzo kopurua								
		2	3	4	5	6	7	8	9	10
Zuzenean lurperatutako kableak	Kontaktuan (d=0 cm)	0,76	0,65	0,58	0,53	0,50	0,47	0,45	0,43	0,42
	d=0,2 m	0,82	0,73	0,68	0,64	0,61	0,59	0,57	0,56	0,55
	d=0,4 m	0,86	0,78	0,75	0,72	0,70	0,68	0,67	0,66	0,65
	d=0,6 m	0,88	0,82	0,79	0,77	0,76	0,74	0,74	0,73	-
	d=0,8 m	0,90	0,85	0,83	0,81	0,80	0,79	-	-	-
Hodien barnean lurperatutako kableak	Kontaktuan (d=0 cm)	0,80	0,70	0,64	0,60	0,57	0,54	0,52	0,50	0,49
	d=0,2 m	0,83	0,75	0,70	0,67	0,64	0,62	0,60	0,59	0,58
	d=0,4 m	0,87	0,80	0,77	0,74	0,72	0,71	0,70	0,69	0,68
	d=0,6 m	0,89	0,83	0,81	0,79	0,78	0,77	0,76	0,75	-
	d=0,8 m	0,90	0,86	0,84	0,82	0,81	-	-	-	-



3.2.1.4 Lurperatze-sakonera

Sakonera (m)	Zuzenean lurperatutako kableak		Hodien barnean lurperatutako kableak	
	$\leq 185 \text{ mm}^2$	$> 185 \text{ mm}^2$	$\leq 185 \text{ mm}^2$	$> 185 \text{ mm}^2$
0,50	1,06	1,09	1,06	1,08
0,60	1,04	1,07	1,04	1,06
0,80	1,02	1,03	1,02	1,03
1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
1,25	0,98	0,98	0,98	0,98
1,50	0,97	0,96	0,97	0,96
1,75	0,96	0,94	0,96	0,95
2,00	0,95	0,93	0,95	0,94
2,50	0,93	0,91	0,93	0,92
3,00	0,92	0,89	0,92	0,91

3.2.2 Aireko instalazioa

3.2.2.1 40 °C giro-tenperatura ez duten inguruneak (ITC-LAT-06)

Erregimen iraunkorrenko tenperatura θ_s [°C]	Giro-tenperatura, θ_v [°C]										
	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
105	1,21	1,18	1,14	1,11	1,07	1,04	1	0,96	0,92	0,88	0,83
90	1,27	1,23	1,18	1,14	1,10	1,05	1	0,95	0,89	0,84	0,78
70	1,41	1,35	1,29	1,23	1,16	1,08	1	0,91	0,82	0,71	0,58
65	1,48	1,41	1,34	1,27	1,18	1,10	1	0,89	0,78	0,63	0,45

Taulan agertzen ez diren kasuetarako, honako adierazpen honekin kalkula daiteke zuzenketa-faktorea:

$$F = \sqrt{\frac{\theta_s - \theta_a}{\theta_s - 40}}$$

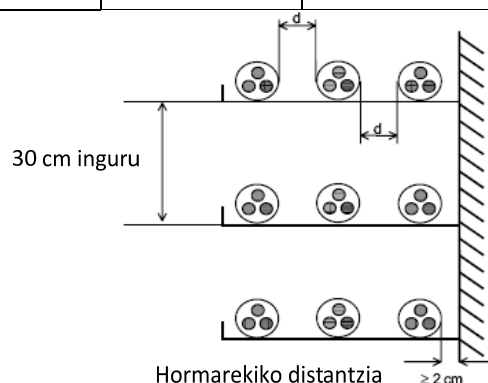
3.2.2.2 Galeriatan instalatutako kableak (ITC-LAT-06)

15 °C-ko gaitenperatura irudikatu, eta aplikatu aurreko zuzenketa-faktorea.

3.2.2.3 Airean instalaturiko hiru poloko kable edo kable polobakar hirukote multzoak (ITC-LAT-06 y UNE 211435)

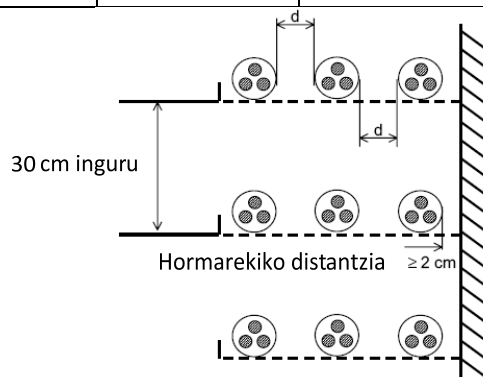
Erretilu jarraituen gaineko kableak (aire-zirkulazio mugatua), kableen arteko banaketa diametro batekoa izanik

Zuzenketa-faktorea					
Erretilu kopurua	Kable kopurua				
	1	2	3	6	9
1	0,95	0,90	0,88	0,85	0,84
2	0,90	0,85	0,83	0,81	0,80
3	0,88	0,83	0,81	0,79	0,78
6	0,86	0,81	0,79	0,77	0,76



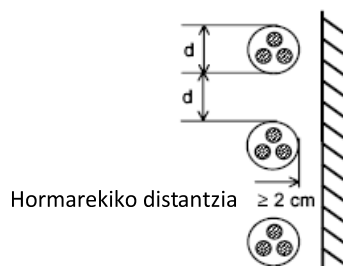
Erretilu zulatuen gaineko kableak, kableen arteko banaketa diametro batekoa izanik

Zuzenketa-faktorea					
Erretilu kopurua	Kable kopurua				
	1	2	3	6	9
1	1	0,98	0,96	0,93	0,92
2	1	0,95	0,93	0,90	0,89
3	1	0,94	0,92	0,89	0,88
6	1	0,93	0,90	0,87	0,86



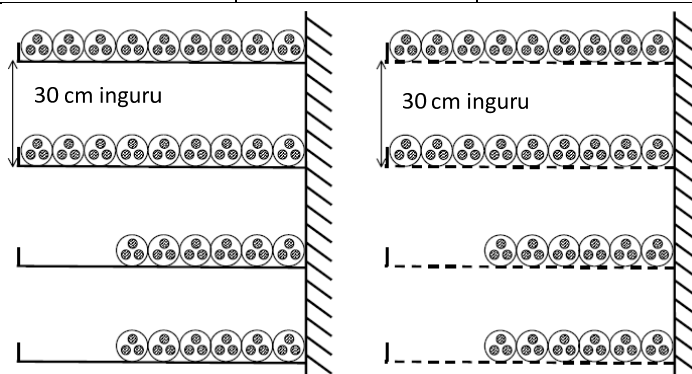
Horma edo egituren gaineko kableak, beren arteko banaketa diametro batekoa izanik

Kable kopurua	Zuzenketa-faktorea
1	1
2	0,93
3	0,90
6	0,87
9	0,86



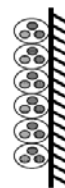
Erretilu jarraituen edo zulatuen gaineko kableak elkarren artean kontaktuan

Zuzenketa-faktorea				
Erretilu kopurua	Erretilu kopurua			
	2	3	6	9
1	0,84	0,80	0,75	0,73
2	0,80	0,76	0,71	0,69
3	0,78	0,74	0,70	0,68
6	0,76	0,72	0,68	0,66



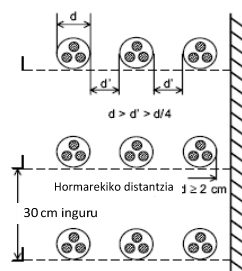
Horma edo egituren gaineko kableak, elkarren artean kontaktuan

Kable kopurua	Zuzenketa-faktorea
1	0,95
2	0,78
3	0,73
6	0,68
9	0,66



Diametro bat baino banaketa txikiagodun eta diametro laurdena baino banaketa handiagodun kableen multzokatzea erretilu zulatuetan

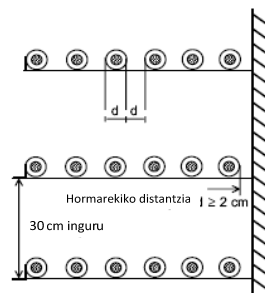
Erretilu kopurua	Zuzenketa-faktorea			
	Horizontalki jarritako kable kopurua			
	1	2	3	>3
1	1,00	0,93	0,87	0,83
2	0,89	0,83	0,79	0,75
3	0,80	0,76	0,72	0,69
>3	0,75	0,70	0,66	0,64



OHARRA. Atal honetan agertutako taulentzat, UNE 20435 arauak esaten zuen ez zela beharrezkoa zuzenketa-faktoreak aplikatzea kableen arteko banaketa $2d$ edo $2d$ baino handiagoa zenean. ITC-LAT-06ak eta UNE 211435ak ez dute horri buruz ezer aipatzen.

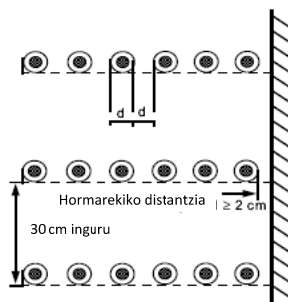
Diametro bateko banaketa duten kable multzoak erretilu jarraituen gainean

Erretilu kopurua	Zuzenketa-faktorea		
	Erretilu kopurua		
	1	2	3
1	0,92	0,89	0,88
2	0,87	0,84	0,83
3	0,84	0,82	0,81
6	0,82	0,80	0,79



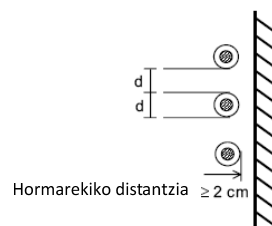
Diametro bateko banaketa duten kable multzoak erretilu zulatuetsuen gainean

Erretilu kopurua	Zuzenketa-faktorea		
	Hirukote multzoa		
	1	2	3
1	1	0,97	0,96
2	0,97	0,94	0,93
3	0,96	0,93	0,92
6	0,94	0,91	0,90



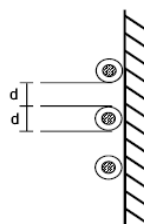
Horma edo egitura gaineko kableak, diametro bateko distantziara banatuak, hormatik 2 cm-ko distantziara

Hirukote kopurua	Zuzenketa-faktorea
2	0,91
3	0,89



Horma edo egitura gaineko kableak, diametro bateko distantziara banatuak

Hirukote kopurua	Zuzenketa-faktorea
2	0,86
3	0,84



3.2.2.4 Zuzenean eguzkipean dauden kableak

0,9ko zuzenketa-faktorea gomendatzen da.

3.3 Zirkuitulabur-intentsitate maximo onargarriak

Kobrezko eroaleentzat, zirkuitulabur intentsitate-dentsitate maximoa, [A/mm ²]											
Isolatzaille mota	$\Delta\theta^*$	Zirkuitulaburraren iraupena, t_c , segundotan									
		0,1	0,2	0,3	0,5	0,6	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
PVC: Sekzioa $\leq 300 \text{ mm}^2$ Sekzioa $> 300 \text{ mm}^2$	90	363	257	210	162	148	115	93	81	72	66
	70	325	229	187	145	132	102	83	72	65	59
XLPE, EPR, HEPR $U_0/U > 18/30 \text{ kV}$	160	452	319	261	202	184	143	116	101	90	82
HEPR $U_0/U \leq 18/30 \text{ kV}$	145	426	301	246	190	174	135	110	95	85	78

* $\Delta\theta$ erregimen iraunkorreko eta zirkuitulabur-egoerako temperaturren arteko diferentzia da

Aluminiozko eroaleentzat, zirkuitulabur intentsitate-dentsitate maximoa, [A/mm ²]											
Isolatzaille mota	$\Delta\theta^*$	Zirkuitulaburraren iraupena, t_c , segundotan									
		0,1	0,2	0,3	0,5	0,6	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
PVC: Sekzioa $\leq 300 \text{ mm}^2$ Sekzioa $> 300 \text{ mm}^2$	90	240	170	138	107	98	76	62	53	48	43
	70	215	152	124	96	87	68	55	48	43	39
XLPE, EPR, HEPR $U_0/U > 18/30 \text{ kV}$	160	298	211	172	133	122	94	77	66	59	54
HEPR $U_0/U \leq 18/30 \text{ kV}$	145	281	199	162	126	115	89	73	63	56	51

* $\Delta\theta$ erregimen iraunkorreko eta zirkuitulabur-egoerako temperaturren arteko diferentzia da

Tauletako iraupenak ez dituzten zirkuitulaburrak kalkulatzeko:

$$\frac{I_{cc}}{S} = \frac{K}{\sqrt{t_{cc}}}$$

Non:

I_{cc} [A]: Zirkuitulabur-intentsitatea

S [mm²]: Eroalearen sekzioa

t_{cc} [s]: Zirkuitulaburraren iraupena

K : $t_{cc} = 1$ s-ko kasurako, dentsitateen berdina den koefizientea

BIBLIOGRAFIA

Industria, Merkataritza eta Turismo Ministerioa. *REAL DECRETO 223/2008, de 15 de febrero, por el que se aprueban el Reglamento sobre condiciones técnicas y garantías de seguridad en líneas eléctricas de alta tensión y sus instrucciones técnicas complementarias ITC-LAT 01 a 09.*

Working Group B2.12. April 2008. *Brochure 345: Alternating Current (AC) Resistance of Helically Stranded Conductors.* s.l.: CIGRE, 2008ko apirila.

Industria, Merkataritza eta Turismo Ministerioa. *RESOLUCIÓN de 22 de marzo de 2005, de la Secretaría General de la Energía, por la que se aprueba el Procedimiento de Operación 13.1. «Criterios de Desarrollo de la Red de Transporte », de carácter técnico e instrumental necesario para realizar la adecuada gestión técnica del Sistema Eléctrico.*

IEEE. *IEEE Std 738™-2006 Standard for Calculating the Current-Temperature of Bare Overhead Conductors.*

Working Group B2.12. August 2006. *Brochure 299: Guide for Selection of Weather Parameters for Bare Overhead Conductor Ratings.* s.l. : CIGRE, 2006ko abuztua.
