

PROBLEMA TRANSPORTULUI DE ENERGIE SUB TENSIUNI FOARTE INALTE

(Urmare*)

I. GH. LĂZARESCU

Inginer la Soc. de Gaz și Electricitate
din București

Metode aproximative de calcul analitic

După cum rezultă din exemplele tratate, metodele exacte de calcul răpesc mult timp și s'a constatat că practicește nu oferă un câștig simțitor, față de unele procedee aproximative.

De altfel, ecuațiile problemei de transport de energie, — care au fost un câmp vast, frământat mereu, de zeci de ani, atât de spiritul teoretic al matematicienilor și savanților, cât și de spiritul ponderat al practicienilor — oferă nenumărate metode aproximative de calcul analitic.

Astfel, Nils Forsblatt — E. T. Z. 1912, pag. 1259, — tratează problema din punct de vedere al reglajului tensiunii, susținând, cu drept cuvânt, că ceea ce interesează mai mult pentru practică nu este diferența de tensiune între generator și receptor, la o sarcină oarecare, ci mai ales diferența de tensiune între mersul în gol și plină sarcină — tensiunea la generator menținându-se constantă.

Observând că la mers în gol căderea de tensiune între generator și receptor este practicește independentă de capacitatea liniei, iar la mers în sarcină căderea de tensiune, datorită capacității, este independentă de distanța între conductorii liniei, de secțiunea conductorilor și de tensiunea liniei, și variază numai proporțional cu patratul distanței de transport, — stabilește formule foarte simple pentru calculul tensiunii la receptorul funcționând în gol și în sarcină.

Vezi B. S. P. No. 2 a. c.

D-1 Biermans — E. T. Z. 1921 — pornește dela teorema D-lui Blondel și adunând geometric vectorii reprezentativi ai stării de gol și de scurt circuit, rezolvă analitic triunghiurile formate. Pentru calculul vectorilor respectivi, dezvoltă în serie formulele exacte.

W. Rung—E. T. Z. 1924 H. 13—arată că, prin dezvoltarea în serie, expresiile \sinh și \cosh — cari intră în ecuațiile tensiunii și curentului — se pot calcula cu ajutorul unui termen $L^2 \cdot C \cdot R$, care se calculează pentru fiecare linie în parte, precum și a patru constante cari depind numai de lungimea liniei și pe cari le calculează într'un tablou, pentru linii între 100 și 1000 km.

Dezvoltarea în serie a formulelor exacte a fost întrebuințată prima oară în 1908, de D-nii Blondel & Leroy, cari au arătat că seriile :

$$\begin{aligned}\cosh mn &= 1 + \frac{m^2 n^2}{2!} + \frac{m^4 n^4}{4!} + \dots \\ \sinh mn &= mn + \frac{m^3 n^3}{3!} + \frac{m^5 n^5}{5!} + \dots\end{aligned}$$

sunt foarte repede convergente și că, pentru nevoile practice, — erori minime în calcul — este suficient să ne limităm la primii 2—3 termeni ai dezvoltărilor.

Demonstrația și calculul erorilor — în cece privește mărimile și fazele vectorilor \cosh și \sinh , formează un capitol, tratat de autorii menționați într'o formă matematică foarte elegantă.

D-1 Thielemans, în lucrarea sa „Calculs, diagrammes et régulation des lignes de transport d'énergie à longue distance” — conchide că, pentru linii de 60—30—25 km și frecvențe respectiv de 25—50—60 per/sec este suficient să oprim din dezvoltare primul termen, calculând practicește exact cu formula :

$$\begin{aligned}V &= V_0 + \sqrt{R^2 + L^2 \omega^2} I_0 \\ I &= I_0 + \sqrt{G^2 + C^2 \omega^2} V_0.\end{aligned}$$

La aceste linii, dacă tensiunea este mai mică de 15000 V. se poate neglija și efectul capacității — termenul $G + jC\omega$ din relațiile de mai sus — astfel încât formulele de calcul sunt :

$$\begin{aligned}V &= V_0 + \sqrt{R^2 + L^2 \omega^2} I_0 \\ I &= I_0\end{aligned}$$

Pentru linii mai mici de 600—300—250 km pentru frecvențe respective 25—50—60 per/sec, se pot păstra din desvoltarea în serie, doi termeni.

Oprind primii trei termeni ai seriilor, obținem formule ce se pot aplică pentru linii de 1000 km și frecvențe 50 per/sec.

Pentru linii mai lungi, e nevoie să păstrăm mai mulți termeni, și calculele devin plictisitoare — formulele exacte fiind de preferat.

Procedee și metode grafice de calcul

Înainte de 1906, rezolvarea grafică a ec. problemii consta în trasarea și adunarea generală a vectorilor $e^{(\alpha+j\beta)x}$ cari intră în compunerea lui \cosh și \sinh . Acești vectori au, după cum știm, lungimea $e^{\alpha x}$ și fac unghiul βx cu axele de coordonate. Curbele $e^{(\alpha+j\beta)x}$ rezultate, sunt spirale logaritmice, de aceea procedeul de calcul grafic se reducea la construcția spiralelor logaritmice respective. F. Breisig E. T. Z. 1900; Feldmann & Herzog ed. 1921.

În 1906 D-l Blondel construiește grafic ecuațiile problemii.

$$V = V_2 \cosh mx + z I_2 \sinh mx$$

$$I = I_2 \cosh mx + \frac{1}{z} V_2 \sinh mx.$$

reprezentând vectorii respectivi prin modulul și argumentul lor, calculate prin tabele de funcțiuni hiperbolice reale. De altfel, se pot folosi pentru asta și tabelele funcțiunilor hiperbolice vectoriale, ale lui Keneley, sau abacele lui Brown sau Blondel.

În 1909, D-l Blondel, împreună cu D-l Lavanchy, simplifică calculele, prin desvoltarea în serie a expresiunilor \sinh și \cosh , ceea ce conduce la numeroase construcții grafice simplificate, precum epura Blondel, metoda de calcul Blondel-Lavanchy, etc.

Stabilirea unor procedee de calcul grafic constituie de fapt o problemă de geometrie, care a căpătat soluții multiple. Chiar în 1927 găsim în R. G. E. No. 21, metoda D-lui Kotelnikoff, care constă în construcția grafică a undelor directe și reflectate — pentru fiecare sarcină a receptorului — a căror compri-

mare, după cum știm, dă tensiunea sau curentul în diferite puncte ale liniei.

Procedeele de mai sus sunt de fapt traducerea grafică a metodelor analitice descrise mai înainte. Erorile ce implică se pot determina cu ușurință.

Mai expeditiv pentru calcul este a concentra capacitatea liniei în anumite puncte și a calcula grafic, cu diagrama cunoscută a curenților alternativi.

Intrucât aici nu mai avem posibilitatea de a calcula analitic erorile, s'a făcut compararea rezultatelor cu cele obținute prin metode exacte și astfel s'au putut stabili limitele de aplicare ale diferitelor procedee de calcul grafic imaginate — limite cari evident că depind în primul rând de lungimea liniei de transport.

Pentru linii aeriene mai scurte de 100 km, se poate calcula cu capacitatea întregii linii presupusă concentrată într'un singur punct.

Dacă se concentrează capacitatea la capătul liniei, avem un curent capacitiv mai mic decât cel real, întrucât acolo tensiunea este mai mică.

Dacă se concentrează capacitatea la originea liniei, (generator), este invers.

Nu se poate spune însă a priori în ce sens se schimbă — prin procedeele de mai sus — curentul total, pierderea de tensiune, tensiunea la generator, etc., căci aceste elemente depind una de alta, precum și de decalajul receptorului.

În orice caz, s'a găsit că, pentru linii mai lungi de 100 km, se obține eroare mai mică dacă se calculează odată cu capacitatea concentrată la capătul liniei, apoi cu ea concentrată la originea liniei și se ia media rezultatelor obținute.

D-l Breitfeld găsește că procedeul cel mai nimerit este de a concentra întreaga capacitate la ambele capete ale liniei — metodă aplicabilă pentru lungimi de linie mai mici decât «lungimea critică», ce urmează să se calculeze pentru fiecare linie în parte, după o formulă indicată în lucrarea sa «Berechnung von Wechselstrom-Fernleitungen» pag. 21.

Feldmann & Herzog, în tratatul citat, conchid că, pentru

linii aeriene oricât de lungi, este suficient să concentrăm capacitatea în puncte depărtate cu câte 100 km.

Evident, cu cât înmulțim numărul acestor puncte — micșorând distanța dintre ele, — obținem rezultate mai exacte.

Totul depinde deci, de timpul și răbdarea operatorului.

Metoda aceasta, are marele avantaj că indică mărimile căutate, în diferite puncte ale liniei, și aceasta fără calcule greoaie.

Când liniile au lungimi mari, am arătat că cunoașterea mărimilor electrice în diferite puncte este foarte necesară, întru cât tensiunile sau intensitățile pot diferi simțitor în lungul liniei și cunoașterea lor servește la verificarea izolației.

Un procedeu rapid de calcul al regimurilor în diferite puncte ale liniei, ne oferă abacele Blondel-Brown și Blondel-Keneley cari, din punct de vedere teoretic, sunt abace de funcțiuni hiperbolice vectoriale și cari oferă un procedeu de calcul exact, înlocuind folosirea tabelelor de funcțiuni hiperbolice vectoriale.

În ecuațiile problemei :

$$V = V_2 \cosh mx + x I_2 \sinh mx$$

$$I = I_2 \cosh mx + \frac{1}{x} V_2 \sinh mx.$$

D-1 Blondel introduce două constante convenabile :

$$\operatorname{tgh} \omega_1 = x \frac{I_2}{V_2} \quad \text{și} \quad \omega = \omega_1 + mx \quad \text{unde} \quad \operatorname{tgh} \omega = \frac{I}{V}$$

astfel încât aceste ecuații iau forma :

$$\left\{ \begin{array}{l} V = V_2 \frac{\cosh(\omega_1 + mx)}{\cosh \omega_1} = V_2 \frac{\cosh \omega}{\cosh \omega_1} \\ I = I_2 \frac{\sinh \omega}{\sinh \omega_1} \end{array} \right.$$

Datele problemei sunt, în general: x , I_2 , V_2 și m , astfel încât expresia $\operatorname{tgh} \omega_1 = x \frac{I_2}{V_2}$ se calculează ușor, sub forma

$\bar{b} \times \beta$ (vector b , ce face unghiul p cu axa de coordonate). Abacele respective, trebuiesc să indice unghiul ω_1 și ω , corespunzător vectorului $\operatorname{tgh} \omega_1$ cunoscut din datele problemei.

Abaca lui Blondel-Brown are un câmp limitat de două axe de coordonate. În acest câmp sunt trasate curbele $\beta = kt$ și

$b = kt$ — ale mărimilor ce rezultă din datele problemei — aceste curbe sunt concurente, iar punctelor lor de intersecție le corespund abscisa ω'_1 și ordonata ω_1'' ale unghiului ω_1 căutat.

În abaca Blondel-Kenely, în abscise găsim abscisele b' , iar în ordonate, ordonatele b'' , ale vectorului b , ce rezultă din datele problemei. Punctele corespunzătoare din plan sunt intersecția curbelor $\omega'_1 = kt$. și $\omega_1'' = kt$. căutate.

În ambele abace, unghiul $\omega_1 + mx$ se obține construind vectorul mx , în continuarea vectorului ce reprezintă ω_1 .

Fiecare din aceste metode suprapune pe aceeași foaie o abacă a modulelor cosh-construită după aceleași norme ca și abacele tangentelor hiperbolice descrise, astfel încât odată găsite ω_1 și $\omega_1 + mx$, rezultă imediat și $\cosh \omega_1$ resp. $\cosh(\omega_1 + mx)$.

Enațiile problemei (a) sunt imediat rezolvate, prin raportul mărimilor de mai sus.

Abace deosebite de \cosh (modul și argument constante pentru un unghi dat), construite după aceleași norme, completează ansamblul, dând posibilitatea calculării cu ușurință și a defazajului între tensiunile din diferite puncte ale liniei.

Metode grafice, pentru studiul rapid al liniilor funcționând sub regimuri diferite

Am examinat o serie de metode pentru calculul unui regim anumit de funcționare și am arătat unele metode ce permit ușor urmărirea mărimilor electrice în lungul liniei, pentru un regim în studiu.

Pentru calculul unei linii de transport, urmează să ne alegem sub ce regim să studiem problema, regim care în general se alege cel de funcționare normală, urmând să verificăm rezultatele și pentru cel puțin un alt regim mai defavorabil.

Alegerea regimului cel mai defavorabil depinde de obișnuința celui ce calculează, care se poate ghida și de exemplul unor linii existente.

La o linie în funcțiune, este nevoie ca inginerul să-și poată da seama de comportarea ei la mai multe regimuri de funcționare.

Metodele grafice, cari să îngăduie rapid un astfel de studiu, sunt bine venite și, în orice caz, problema a fost studiată și din acest punct de vedere.

Pentru a nu încărea prea mult expunerea, ne vom mărgini să recomandăm cititorilor unele metode ce permit studiul rapid al anumitor regimuri, precum metoda lui Baum (1903) sau metoda lui Ossana (1925), (vezi Kunsinen F. T. Z. 1925 pag. 1800) cari stabilesc foarte simplu câte un calculator pentru determinarea rapidă a tensiunilor la receptor, în funcție de sarcina primară, sau secundară (la capetele liniei); precum și calculatorul lui Miss Clark care, prin ajutorul unor drepte și sectoare circulare gradate,—ce se determină ușor pentru o linie dată,—permite calculul rapid al raportului între tensiunile dela extremitățile liniei; vezi Ch. Lavanchy «Calcul électrique des lignes par l'emploi de diagrammes et d'abaques » 1926.

Ne vom opri mai mult asupra a două metode mai importante: metoda d-lui Thielemans și metoda d-lui E. Schönholzer.

D-l Thielemans—«Calculs, diagrammes et régulation des lignes de transport d'énergie à longue distance», Paris VIII-e, într'o formă matematică academică,—prin suprapunerea vectorilor dela regimul în gol, sub tensiunea dată și a celor dela mersul în scurt circuit sub curentul dat,—stabilește o diagramă tripolară, pe care d-l Lavanchy — în lucrarea citată — o deduce pornind dela ecuațiile generale:

$$V = V_2 \cosh mx + x I_2 \sinh mx.$$

$$I = I_2 \cosh mx + \frac{1}{x} V_2 \sinh mx.$$

din cari, eliminând I_2 , obține:

$$V = V_2 [\cosh mx - \operatorname{tgh} mx \cdot \sinh mx] + x I \operatorname{tgh} mx.$$

— ecuația care dă diagrama tripolară căutată:

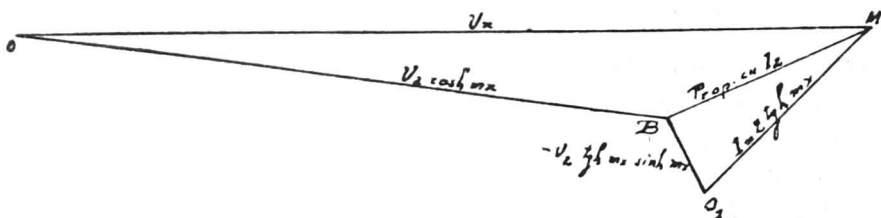


Fig. 2.

în care triunghiul OBO_1 , având laturile proporționale cu V_2 (care este constant pentru o linie dată), rămâne fix, oricare ar fi regimul de funcționare al liniei.

Polul O este originea vectorilor OM , ce reprezintă tensiunea căutată V .

Polul B este originea vectorilor BM , proporționali cu I_2 după cum se poate ușor verifica.

Polul O_1 este originea vectorilor O_1M , proporționali su I căutat, astfel încât, mărimea vectorilor respectivi se obține deplasând convenabil, în plan, punctul lor comun M —ceea ce se face, după condițiile și datele problemei, prin ajutorul topogramelor—curbe cari sunt locul geometric al tuturor punctelor ce corespund unei proprietăți date.

Topogramele practicei curente sunt curbe de gradul I sau gradul II, ce se pot construi cu ușurință.

Astfel, s'a demonstrat că:

1. Topograma tensiunilor la generator, în diferite regimuri de funcționare, este o rețea de cercuri, cu centrul în O .
2. Topograma defazajului tensiunii la generator este un fascicol de drepte concurente în punctul O .
3. Topograma curenților la receptor este o rețea de cercuri, cari au centrul în B .
4. Topograma defazajului curentului dela receptor este un fascicol de drepte concurente în punctul B .
5. Topograma puterilor active și reactive e constituită prin două grupe de drepte paralele la axe respective de coordonate, axe cari se determină imediat.
6. Topograma curenților la generator este o rețea de cercuri cu centrul în O_1 .
7. Topograma defazajelor constante la generator este un ansamblu de cercuri, cari au centrul pe o perpendiculară pe mijlocul dreptei $O O_1$.
8. Topograma puterilor active la generator este formată de cercuri ale căror centre se pot calcula ușor.
9. Topograma puterilor reactive constante, la generator, este o rețea de cercuri concentrice, al căror centru se deduce imediat.
10. Topograma randamentelor este un fascicol de cercuri, al căror ax radical se poate ușor determina.

Stabilirea topogramelor este o problemă de geometrie, care

a fost foarte mult cercetată și a condus uneori la curbe de grad mai înalt, cari însă pierd importanța practică, neputând fi construite ușor.

Diagrama propusă de d-l Thielemans este completată, în mod obișnuit, cu toate topogramele posibile, astfel încât, în planul hârtiei avem o rețea multiplă de coordonate rectangulare sau circulare, care formează tabloul grafic de funcționare al liniei.

Trasarea diagramei cere fixarea în prealabil a scărilor metrice necesare diferitelor elemente ce intervin — muncă greoaie, care este însă compensată de ușurința cu care diagrama rezolvă problema, oricari ar fi ipotezele puse. precum și, în special, de ușurința ce aduce în studiul condițiilor de reglaj al tensiunii, — problemă de importanță capitală în transportul de energie la distanță.

D-l Ernest Schönholzer în Schweizerische Techniker-Zeitung, Februar 1922, stabilește o diagramă care determină numai tensiunea, curentul și decalajul lor, la generator, pentru aceleași elemente cunoscute la receptor, și este mai comodă pentru inginerul practician, atât în studiul liniei funcționând sub regimuri diferite, cât și în studiul reglajului tensiunii.

După cum am văzut și mai înainte, — teorema d-lui Blondel, — starea de regim, la o linie de transport, se obține prin suprapunerea celor două stări particulare: de funcționare în gol și în scurt circuit — corespunzând regimului în studiu. Ecuațiile problemei însăși arată că această suprapunere implică adunarea geometrică a vectorilor respectivi.

$$(a) E_x = \underbrace{E_2 \cosh mx}_{E_0} + \underbrace{x I_2 \sinh mx}_{E_{sc. c.}}$$

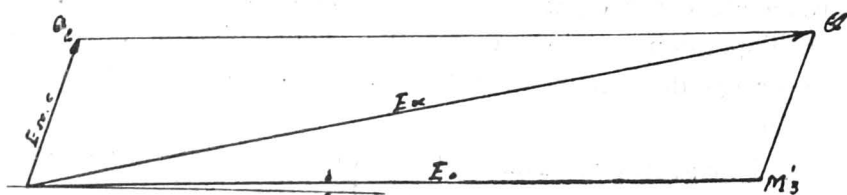


Fig. 3.

$$(a) I_x = I_2 \underbrace{\cosh mx}_{I_{sc. c.}} + \frac{1}{z} E_2 \underbrace{\sinh mx}_{I_0}$$

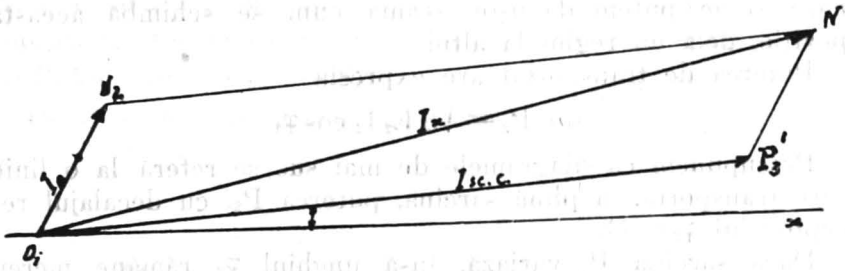


Fig. 4.

Metoda Schönholzer înlocuiește adunările acestea vectoriale,

$$E_x = (E_{sc. c.}) + (E_0)$$

$$I_x = (I_0) + I_{sc. c.}$$

prin scăderile:

$$E_x = (E_{sc. c.}) - (-E_0)$$

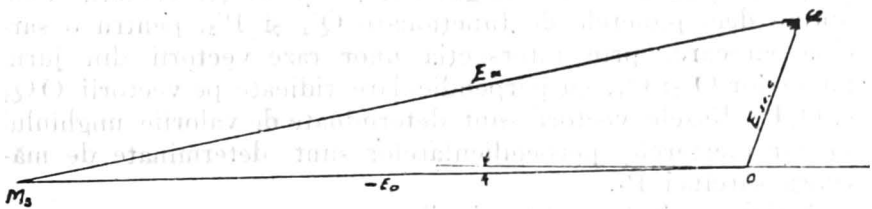


Fig. 5.

$$I_x = (I_0) - (-I_{sc. c.})$$

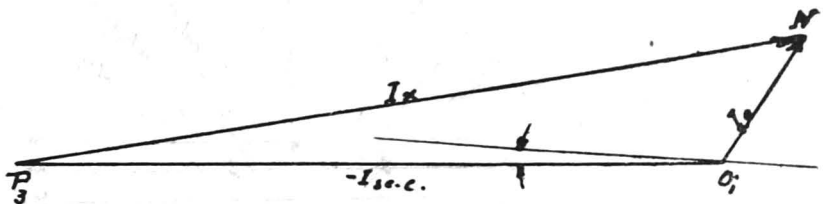


Fig. 6.

și determină vectorii E_x și I_x , a căror origine va fi în M_3 , respectiv P_3 — pentru ca sensul lor să fie: $M_3 Q_2$ și $P_3 N_2$.

Observăm — din ecuațiile de mai sus —, că vectorii E_0 și I_0 — mersul în gol —, nu depind decât de tensiunea dela receptor, care nu trebuie să varieze cu sarcina acestuia, deci — pentru o linie dată —, acești vectori rămân neschimbați în mărime și în fază; punctele O, O_1, M_3 și N_2 rămân deci fixe în plan, oricare ar fi regimul de funcționare.

Vectorii $E_{sc.c.}$ și $I_{sc.c.}$, fiind proporționali cu I_2 , variază în mărime și fază, cu regimul transmisiunii, astfel încât poziția punctelor P_3 și Q_2 în plan, depinde de regimul de funcționare și ne putem da ușor seama cum se schimbă această poziție, dela un regim la altul.

Puterea de transportat are expresia:

$$(b) P_2 = \sqrt{3} E_2 I_2 \cos \varphi_2.$$

Presupunem că diagramele de mai sus se referă la o linie care transportă, la plină sarcină, puterea P_2 , cu decalajul receptorului $\varphi_2 = 0$.

Dacă sarcina P_2 variază, însă unghiul φ_2 rămâne mereu constant, formulele (a) arată că vectorii $E_{sc.c.}$ și $I_{sc.c.}$ variază în acelaș raport cu P_2 , însă unghiul lor cu axa absciselor rămâne neschimbat. Punctele Q_2 și P_3 se deplasează pe dreptele OQ_2 și O_1P_3 fig. . . .

Dacă acum, $P_2 = kt$ și variază numai φ_2 , formula (b) arată că punctele Q_2 și P_3 se deplasează după drepte perpendiculare respectiv pe vectorii OQ_2 și O_1P_3 din fig. . . — vectorii OQ'_2 și $O_1P'_3$ făcând unghiul $\pm \varphi^0$ cu acești vectori. Vom obține deci punctele de funcționare Q'_2 și P'_3 , pentru o sarcină oarecare, prin intersecția unor raze vectorii din jurul punctelor O și O_1 , cu perpendiculare ridicate pe vectorii OQ_2 și O_1P_3 . Razele vectorii sunt determinate de valorile unghiului φ_2 , iar picioarele perpendicularelor sunt determinate de mărimea sarcinei P_2 .

Astfel, în diagrama tensiunilor :

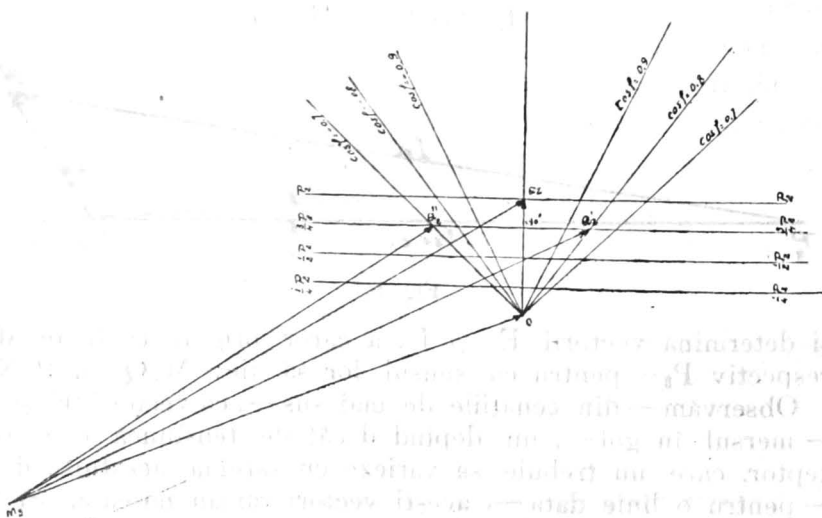


Fig. 7.

vectorul $\overrightarrow{M_3 Q_2}$ reprezintă tensiunea dela uzină, pentru linia transportând P_2 kw sub $\cos \varphi_2 = 1$, pe când vectorul $\overrightarrow{M_3 Q'_2}$ reprezintă tensiunea dela uzină, pentru linia transportând $\frac{3}{4} P_2$ kw, sub $\cos \varphi_2 = 0,8$.

De asemenea, în diagrama curenților:

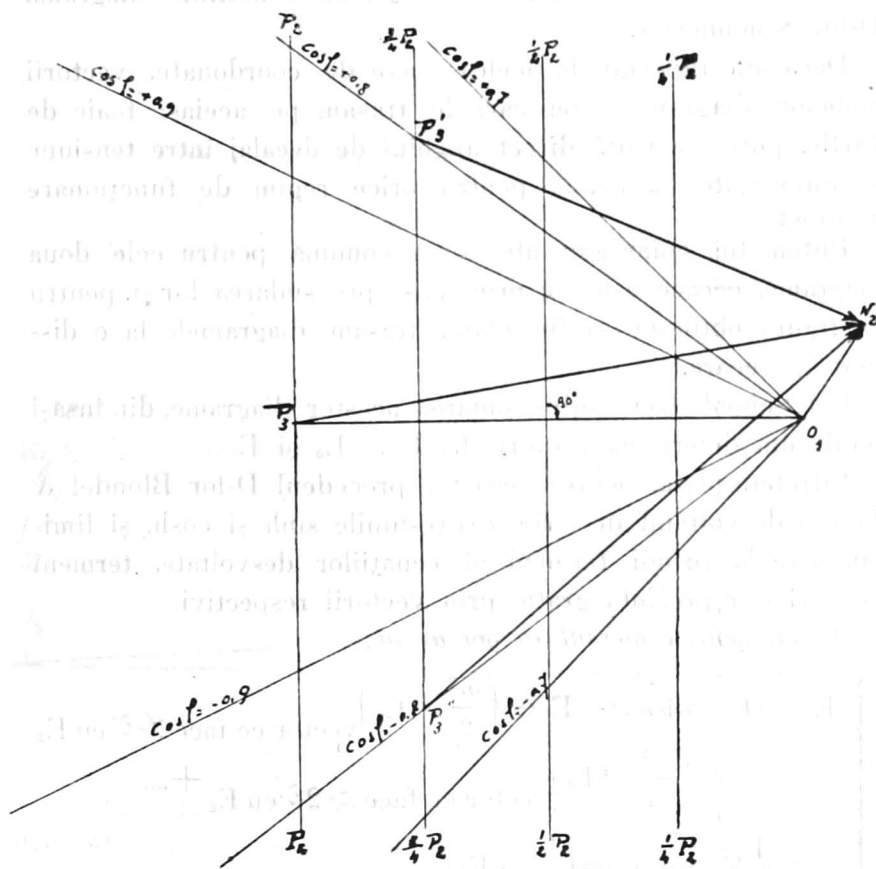


Fig. 8.

vectorul $\overrightarrow{P_3 N_2}$ reprezintă intensitatea curentului la uzină, linia transportând P_2 kw sub $\cos \varphi_2 = 1$, pe când vectorul $\overrightarrow{P'_3 N_2}$ reprezintă intensitatea curentului la uzină, pentru linia transportând $\frac{3}{4} P_2$ kw, sub $\cos \varphi_2 = +0,8$.

Vom construi deci scheletul diagramelor, trasând vectorii

E_{x_0} , $E_{x_{sc.c.}}$, I_{x_0} , $I_{x_{sc.c.}}$, determinați printr'un procedeu oarecare, pentru receptorul funcționând sub P_2 cu $\cos \varphi_2 = 1$.

Vom completa figurile obținute, ridicând perpendicularele în punctele determinate de $\frac{5}{4} P_2$, P_2 , $\frac{3}{4} P_2$, $\frac{1}{2} P_2$ și $\frac{1}{4} P_2$ și trăsând razele vectorii corespunzătoare la $\cos \varphi_2 = \pm 0,9$ și $\cos \varphi_2 = \pm 0,8$.

Ansamblul acestor drepte și diagrame constituie diagrama D-lui Schönholzer.

Dacă am raportat la aceleași axe de coordonate, vectorii ambelor diagrame, — pe cari le trăsăm pe aceeași foaie de hârtie, putem măsura direct unghiul de decalaj între tensiune și intensitate, la uzină, pentru orice regim de funcționare al liniei.

Putem lua chiar axa absciselor comună pentru cele două diagrame, ceea ce este un prim pas spre sudarea lor și, pentru ca figura obținută să fie clară, trăsăm diagramele la o distanță oarecare.

D-l Schönholzer obține sudarea acestor diagrame, din însăși felul cum determină vectorii I_0 , $I_{sc.c.}$, E_0 și $E_{sc.c.}$

Intrebuințează, pentru aceasta, procedeu D-lor Blondel & Leroy, dezvoltând în serie expresiunile \sinh și \cosh , și limitându-se la primii termeni ai ecuațiilor dezvoltate, termeni pe cari îi reprezintă grafic prin vectorii respectivi.

Astfel, pentru mersul în gol avem :

$$\left\{ \begin{array}{l} E_{x_0} = E_2 \cosh mx = E_2 + \left(\frac{m^2}{2} x^2 E_2 \right) \text{vector ce face } \sphericalangle \delta^* \text{ cu } E_2 \\ \quad + \left(\frac{m^4}{24} x^4 E_2 \right) \text{vector ce face } \sphericalangle 2\delta \text{ cu } E_2 + \dots \\ I_{x_0} = \frac{1}{x} E_2 \sinh mx = \left(\frac{1}{x} mx E_2 \right) \text{vector ce face } \sphericalangle \varphi_c \text{ cu } E_2 \\ \quad + \left(\frac{1}{x} \frac{m^3 x^3}{6} E_2 \right) \text{vector ce face } \sphericalangle \varphi_c + \delta \text{ cu } E_2. \end{array} \right.$$

*) δ este unghiul vectorului $m^2 = (R + jL\omega)(G + jC\omega) = r.c.$ — pag. 373 B. P. S. XI.I, astfel încât dacă $\varphi_r = \arctg \frac{L\omega}{R}$ și $\varphi_c = \arctg \frac{C\omega}{G}$, $\delta = \varphi_c + \varphi_r$.

Rezultă deasemenea imediat că vectorul $\frac{m}{x} = c$ face unghiul φ_c cu abscisele iar vectorul $mx = r$ face unghiul φ_r cu abscisele, unde r și c au semnificația și valoarea indicată.

Mers în gol :

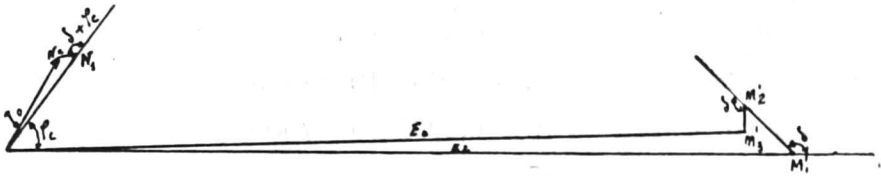


Fig. 9.

Iar pentru scurt circuit avem :

$$\begin{cases} E_{x \text{ sc. c.}} = x I_2 \sinh mx = (xmx I_2) \times \varphi_r \text{ cu } I_2 + \left(\frac{\lambda m^3 x^3}{6} I_2 \right) \times \varphi_r + \delta \text{ cu } I_2 \\ I_{x \text{ sc. c.}} = I_2 \cosh mx = I_2 + \left(\frac{m^2 x^2}{2} I_2 \right) \times \delta \text{ cu } I_2 + \left(\frac{m^4 x^4}{24} I_2 \right) \times 2 \delta \text{ cu } I_2. \end{cases}$$

Mers în scurt circuit :

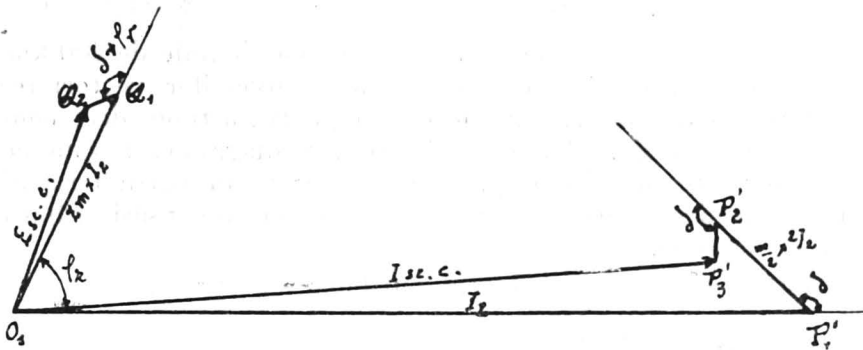


Fig. 10.

Aceste diagrame au, de sigur, aceleași axe de coordonate.

Intru cât — după cele ce am stabilit —, urmează să inversăm vectorii $E_{x o} = O M_3$ și $I_{x \text{ sc. c.}} = O_1 P_3$ și, întru cât vectorii $M_1 M_2$ și $P_1 P_2$ fac același unghi cu axele de coordonate, sudarea se face suprapunând diagramele obținute, astfel încât punctul M_1 să coincidă cu P_1 ($O M_1$ și $O P_1$ făcând 180° cu $O M'_1$ și $O P'_1$).

Intrebuințarea metodei Blondel-Le Roy, pentru determinarea vectorilor de bază este cu atât mai proprie, cu cât permite să ne dăm seama de gradul aproximațiilor impus de calculele noastre. Desigur însă că se poate întrebuința oricare alt procedeu, în calculul vectorilor.

Vom aplica diagrama Schönholzer la cazul studiat de noi al liniei Chancy-Pouigny.

Am avut: pag. 380, lucrarea citată.

$$R = 0,15 \Omega/\text{km}$$

$$G = 0,0296 \cdot 10^{-6} \text{ s/km}$$

$$L = 1,3 \cdot 10^{-3} \text{ h/km}$$

$$C = 0,0091 \cdot 10^{-6} \text{ f/km}$$

$$r = \sqrt{R^2 + L^2 \omega^2} = 0,435 \Omega$$

$$\text{tg } \varphi_r = \frac{2 \pi \cdot 50 \cdot 1,3 \cdot 10^{-3}}{0,15} = 2,72$$

$$\varphi_r = 69^\circ 46'$$

$$c = \sqrt{G^2 + C^2 \omega^2} = 2,859 \cdot 10^{-6} \text{ s}$$

$$\text{tg } \varphi_c = \frac{2 \pi \cdot 50 \cdot 0,0091 \cdot 10^{-6}}{0,0296 \cdot 10^{-6}} = 96,58784$$

$$\varphi_c = 89^\circ 24'$$

deci:

$$m^2 = r \cdot c = 1,2437 \cdot 10^{-6}$$

$$\delta = 159^\circ 10'$$

Vom construi diagrama pentru o lungime de linie de 200 km.

Pentru a arăta ordinea de mărime a diversilor vectori rezultați din dezvoltările în serie — și pentru a trage deci concluzii asupra limitelor de aplicare ale diagramei bazată pe procedeul Blondel-Le Roy, vom opri trei sau patru termeni din acele dezvoltări — după cum ne va permite însăși ordinea lor de mărime.

Astfel, din ecuații deducem imediat:

$$\left. \begin{array}{l} \text{Pentru tensiune} \\ \left\{ \begin{array}{l} O M_1 = \frac{120000}{\sqrt{3}} = 69500. \\ M_1 M_2 = \frac{1}{2} m^2 l^2 E'_2 = \frac{1}{2} \cdot 1,2437 \cdot 10^6 (200)^2 \cdot \frac{120.000}{\sqrt{3}} = 1729. \\ M_2 M_3 = \frac{1}{24} m^4 \cdot l^4 E'_2 = 7,17. \\ M_3 M_3 = \frac{1}{720} m^6 l^6 \cdot E'^2 = 0,019. \\ \hline O Q_1 = (R + j L \omega) l \cdot I_2 = 14605. \\ O_1 Q_2 = (R + j L \omega) \frac{m^2}{6} l^2 = 121. \\ Q_2 O_3 = (R + j L \omega) \frac{m^4}{120} l^4 = 0,30. \end{array} \right. \end{array} \right\}$$

$$\begin{array}{l}
 \text{Pentru curent} \left\{ \begin{array}{l}
 O_1 P_1 = 167,87. \\
 P_1 P_2 = \frac{m^2}{2} l^2 I_2 = 4,17. \\
 P_2 P_3 = \frac{1}{24} m^4 l^4 I_2 = 0,02 \\
 P_3 P_4 = \frac{1}{720} m^6 l^6 I_2 = 0,00003 \\
 \hline
 O_1 N_1 = (G + jC\omega) E'_2 = 39,74 \\
 N_1 N_2 = (G + jC\omega) l E'_2 \cdot \frac{m^2}{6} l^2 = 0,33 \\
 N_2 N_3 = (G + jC\omega) l E'_2 \cdot \frac{m^4}{120} l^4 = 0,0008.
 \end{array} \right.
 \end{array}$$

și diagrama se prezintă ca în figură.

Găsim în această diagramă, a liniei de 200 km. fig. 11:

Funcționarea în gol.

$$\begin{array}{ll}
 I_0 = 39,50 \text{ A} & \text{unghiul lor } \varphi_2 = \\
 V_0 = 67\,900 \text{ V} & \text{deci } \cos \varphi_2 =
 \end{array}$$

Funcționarea în scurt circuit, corespunzând la $\cos \varphi_2 = 0,8$.

$$\begin{array}{ll}
 I_{sc.c.} = 164 \text{ A} & \text{unghiul lor } \varphi_2 = \\
 V_{sc.c.} = 14500 \text{ V} & \text{deci } \cos \varphi_2 =
 \end{array}$$

Funcționarea în sarcină $P_2 = 35000 \text{ KVA}$ sub $\cos \varphi_2 = 0,8$.

$$\begin{array}{ll}
 I = 144 \text{ A} & \text{unghiul lor } \varphi_2 = \\
 V = 80\,600 \text{ V} & \text{deci } \cos \varphi_2 =
 \end{array}$$

Funcționarea în sarcină $P_2 = 35000 \text{ KVA}$ sub $\cos \varphi_2 = 1$

$$\begin{array}{ll}
 I = 169 \text{ A} & \text{unghiul lor } \varphi_2 = \\
 V = 74300 \text{ A} & \text{deci } \cos \varphi_2 =
 \end{array}$$

Valorile acestea nu diferă de cele găsite prin calculele exacte — vezi tablourile respective și fig. No. 1.

Teoretic vorbind, gradul de exactitate al calculelor depinde de numărul termenilor opriți din dezvoltarea în serie.

În această metodă grafică, exactitatea depinde de numărul

DIAGRAMA „SCHÖNHOLZER“

APLICATĂ LA O PORȚIUNE DE 200 KM. DIN LINIA CHANCY-POUGNY-JEANNE ROSE

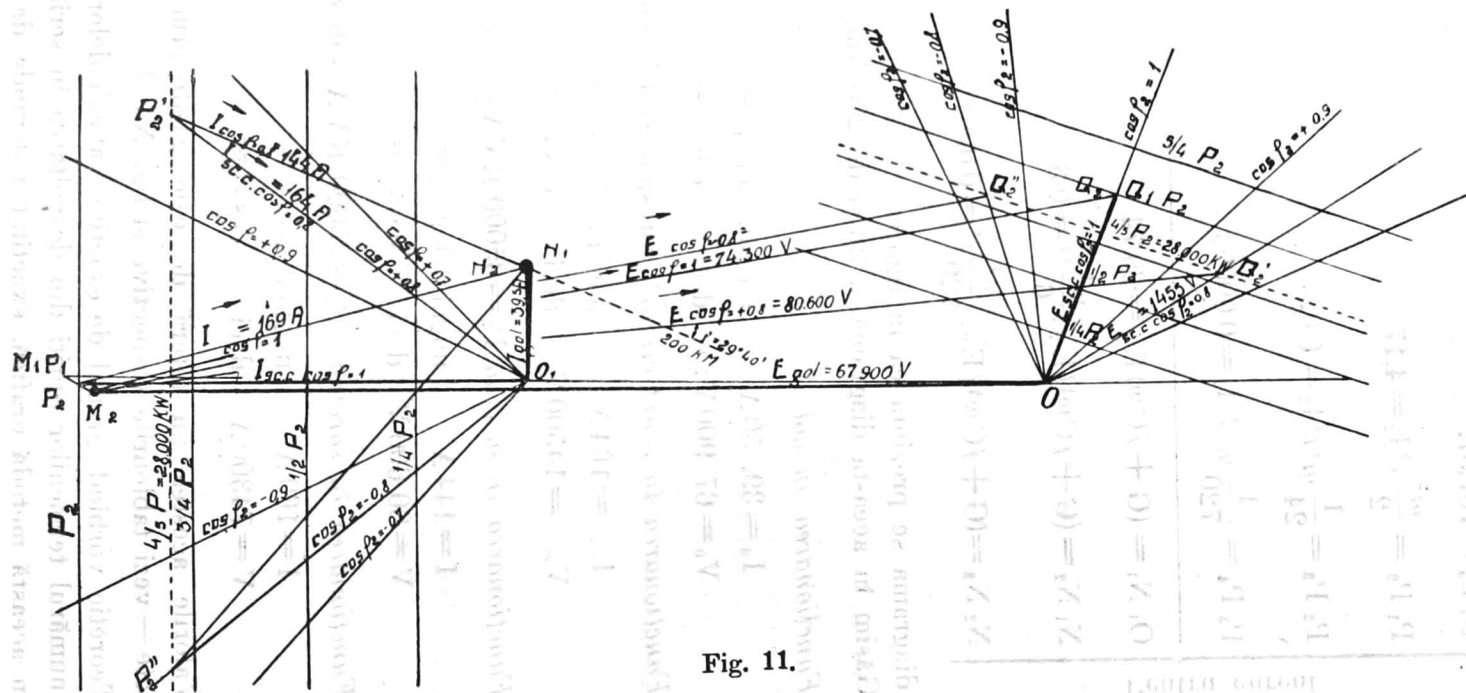


Fig. 11.

termenilor ce pot fi reprezentați, adică, depinde de fapt de scările reprezentării.

D-l Schönholzer recomandă :

Pentru tensiune $1 \text{ KV} = 1 \text{ cm}$.

Pentru curent $1 \text{ A} = 2 \text{ mm}$.

Acestea sunt și scările diagramei noastre No. 11.

După cum se vede, pentru lungimea liniei de 200 km., nu pot fi reprezentați, la scara aceasta, decât primii doi termeni ai dezvoltărilor — ori referindu-ne la concluziile d-lui Thielemans, — acești doi termeni asigură exactitatea practică suficientă pentru linii până la 300 km la frecvențe de 50 per/sec.

Pentru linii de lungime între 300 și 1000 km., la aceleași frecvențe de 50 per/sec, este nevoie de oprit primii trei termeni ai dezvoltărilor și un calcul elementar ne arată că unii dintre vectorii respectivi pot fi reprezentați ușor — cu suficientă exactitate practică —, pe când alții nu pot fi reprezentați ușor cu aproximație necesară. Intre 300 și 1000 km, rezultatele obținute, construind diagrama Schönholzer, prin procedeul Blondel-Le Roy, este de discutat.

Pentru practică ar fi de dorit să dispunem de metode de calcul rapid a cel puțin o parte din elementele problemei în anumite regimuri de funcționare și în diferite puncte din lungul liniei.

Dintre metodele practice citate, se pretează la acest studiu numai metoda lui Baum și metoda Ossana, cari însă presupun cunoscută tensiunea la generator, ceea ce nu este cazul realității, unde în general se cere ca tensiunea la receptor să fie constantă, în orice regim de funcționare. De asemenea, se pretează la acest studiu și metoda d-lui Blondel, bazată pe folosirea abacei Blondel-Keneley (care se găsește la librării și care poate fi folosită chiar și de cei ce nu cunosc felul în care a fost construită), abacă pe care d-l Blondel a demonstrat că se poate construi topograma randamentului și pe care, de fapt se pot construi ușor și alte topograme, precum : a pierderilor, a puterilor, etc. — vezi ch. Lavanchy, lucrarea citată.

După cum credem că rezultă și din expunerea făcută, chestiunea deosebit de interesantă a transportului de energie care azi este în stadiul realizărilor practice chiar și pentru țara noastră, cuprinde probleme complexe și destul de dificile, pentru a căror explicare și rezolvare au scris și scriu încă coloane întregi, în revistele tehnice din străinătate, competențele cele mai recunoscute.

Bazat pe cercetarea unui mare număr din lucrările apărute, — și cari în cea mai mare parte, tratează dispart diferitele chestiuni relative, — studiul de față a avut de scop prezentarea în ansamblu a problemei, atât pentru evidențierea stadiului în care se găsește astăzi chestiunea, cât și pentru răspândirea cunoașterii ei mai aprofundată, în lumea noastră tehnică.

Absolvenții școlii noastre Politehnice, din București, au de altfel îndrumările necesare, din cursul d-lui Prof. I. Ștefănescu Radu, care în ultimii ani, tratează această chestiune în mod pedagogic, pentru cunoașterea fenomenelor ce au loc și calcularea liniilor foarte lungi.

Concluzia noastră este că studiile de până azi au izbutit să stabilească un număr suficient de procedee comode pentru rezolvarea problemei, sub orice formă s'ar prezenta și aceasta, cu orice grad de aproximație dorim.
