

CAPITOLUL 3

MODELAREA ȘI REPREZENTAREA ÎN SCHEMELE MONOFILARE A ELEMENTELOR COMPONENTE ALE UNUI SISTEM ELECTROENERGETIC

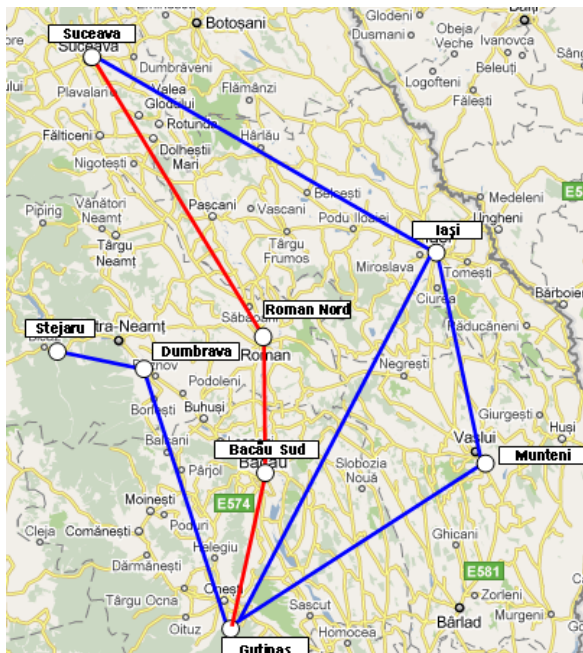
Calculul regimului permanent de funcționare al zonei Moldova a rețelei de transport 400 și 220 kV, reprezentate în Fig. AAC.1 și M1(a), înseamnă, pe scurt, determinarea tensiunilor din toate nodurile rețelei, pe baza schemei de funcționare, parametrilor electrici ai elementelor componente și a sarcinilor și puterilor generate în rețea la un moment dat. În acest scop, se folosesc aplicații specializate, de sine stătătoare sau incluse în pachete de programe specializate pentru analiza rețelelor electrice (EDSA, Neplan, ETAP, DIGSilent Power Factory).

Primul pas necesar pentru realizarea unei asemenea analize este implementarea (reprezentarea) rețelei în program sub forma unei **scheme monofilare** (pe o singură fază) și introducerea datelor de intrare ale problemei, anume a parametrilor electrici ai fiecărui element al schemei (linii, transformatoare, generatoare etc). Elementele schemei sunt reprezentate prin simboluri convenționale a căror dispunere poate sau nu să reflecte amplasamentele și și distanțele din schema reală. Pachetele de programe comerciale sunt prevăzute de obicei cu interfețe grafice care permit construirea facilă a schemelor monofilare. Există însă și situații în care programele citesc datele de intrare din fișiere cu format predefinit, omițând pasul construirii schemei monofilare. În Fig. M.1, sunt prezentate cu titlu de exemplificare schema de principiu (a), schema monofilară „desenată” (b) și schema monofilară construită cu ajutorul programului DIGSilent Power Factory (c).

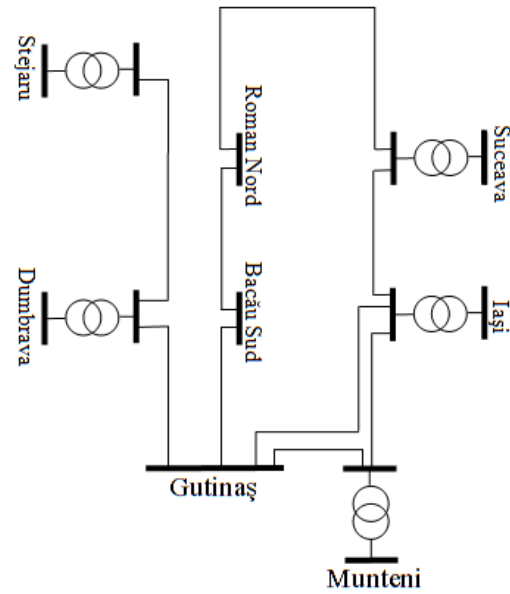
Reprezentarea unei scheme reale trifazate printr-o schemă monofilară este posibilă deoarece calculul regimului permanent al rețelelor electrice folosește câteva ipoteze simplificatoare pentru efortul de calcul, dar suficient de apropiate de realitatea practică. Cele mai importante dintre ele sunt:

- Simetria constructivă a circuitelor electrice și magnetice pe cele trei faze, pentru toate elementele componente ale schemei
- Neglijarea influențelor mutuale între elementele componente.

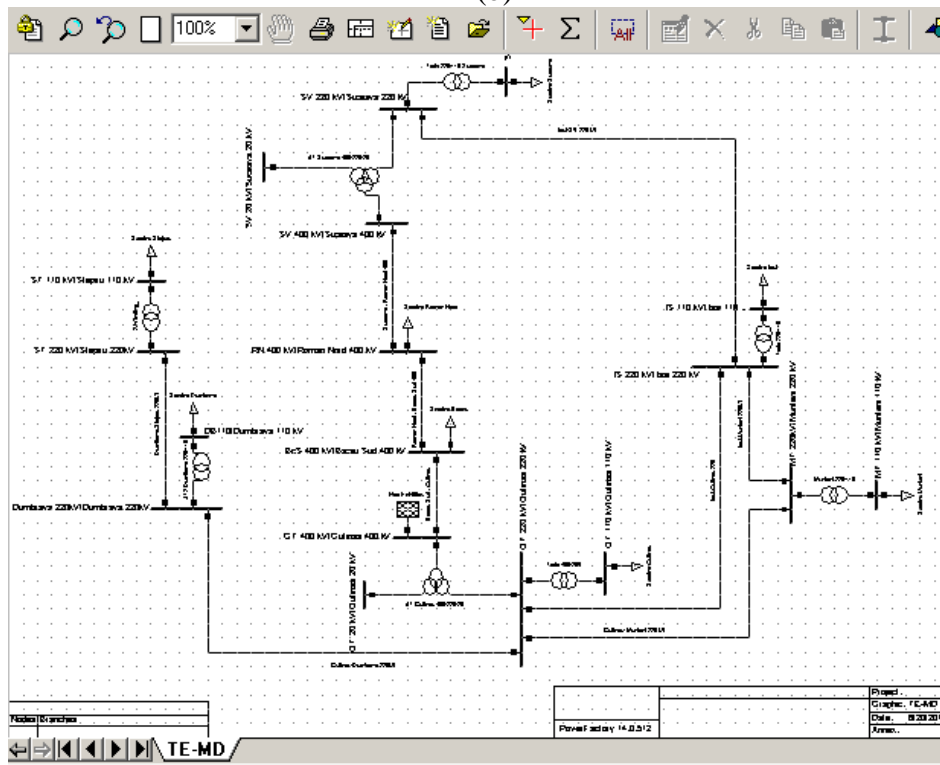
Abaterile de la aceste ipoteze apar în momentul producerii unor fenomene al căror studiu nu face obiectul analizelor de regim permanent. Prin urmare, regimul permanent al SEE se poate studia pe o singură fază, iar rețelele se reprezintă cu ajutorul schemelor monofilare. În orice punct al sistemului, sistemele trifazate de tensiuni și curenți sunt sisteme simetrice de secvență directă, iar parametrii de circuit ai elementelor SEE sunt cei de secvență directă. În aceste condiții, se spune că SEE se află în regim permanent sinusoidal echilibrat (regim simetric), numit în continuare pe scurt **regim permanent**.



(a)



(b)



(c)

Fig. M.1 - Rețeaua de transport de pe teritoriul Moldovei
– schema de principiu și scheme monofilare.

Elementele componente ale SEE, reprezentate în schemele monofilare, sunt de două categorii:

- elemente active (generatoare și sarcini)
- elemente pasive (linii, transformatoare).

3.1. Reprezentarea generatoarelor sincrone.

Reprezentare grafică

Fig. M.2 prezintă reprezentarea grafică în schemele monofilare a unui generator sincron, în programele Neplan (a) și DIGSilent Power Factory (b).

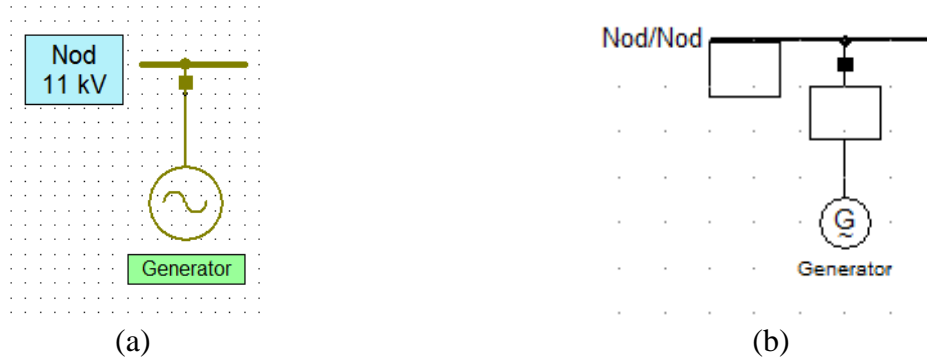


Fig. M.2 – Reprezentarea generatoarelor în programele Neplan (a) și DIGSilent Power Factory

Parametri electrici introduși ca date de intrare în programe de calcul:

- Puterea activă nominală (rated power): P_n [MW]
- Factorul de putere nominal (power factor): $\cos \varphi_n$, $\cos(\phi)$,
- Tensiunea nominală (rated, nominal voltage): U_n [kV]
- Reactanțele sincrone longitudinală (d) și transversală (q) (reactance) x_d, x_q [u.r.] sau [%]

Reprezentare echivalentă matematică, folosită în calcule

Există mai multe reprezentări folosite în practică pentru generatorul sincron:

(a) reprezentarea prin sursă reală de tensiune

Pe baza datelor fundamentale, se calculează:

- puterea aparentă nominală trifazată:

$$S_n = \frac{P_n}{\cos \varphi_n} \text{ [MVA]} \quad (\text{M.1})$$

- impedanța nominală

$$Z_n = \frac{U_n^2}{S_n} \text{ } [\Omega] \quad (\text{M.2})$$

- reactanța GS

$$x_g = x_d \cdot Z_n \text{ } [\Omega] \text{ , } x_g = \frac{x_d}{100} \cdot Z_n \text{ } [\%] \quad (\text{M.3})$$

Schema echivalentă (Fig. M.3) conține o sursă reală de tensiune care are impedanța internă complexă \underline{z}_g conține o sursă ideală de tensiune care generează tensiunea electromotoare (t.e.m.) complexă \underline{E}_g , conectată între borna de fază g și neutru. Curentul care trece prin circuit se notează cu \underline{I}_g

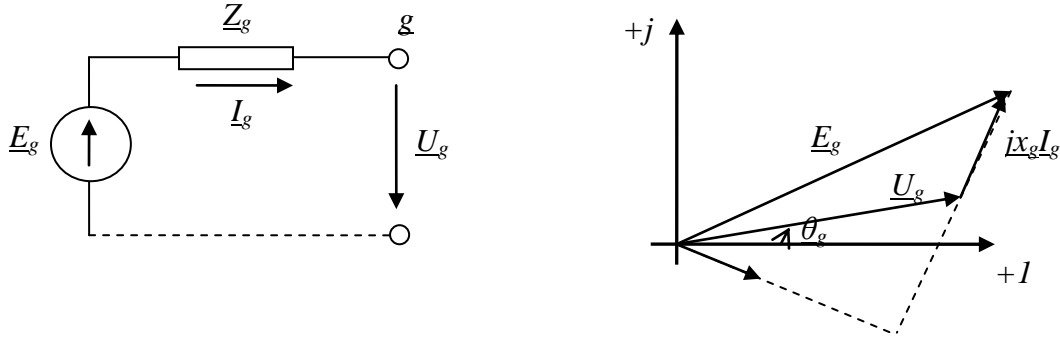


Fig. M.3 – Schema echivalentă și diagrama fazorială a GS reprezentat prin sursă reală de tensiune

De multe ori, rezistența de fază a înfășurării statorului se neglijează, impedanța internă devenind pur inductivă ($\underline{z}_g = j \cdot x_g$).

Ecuția de funcționarea generatorului rezultă:

$$\underline{E}_g = \underline{U}_g + j \cdot \underline{x}_g \cdot \underline{I}_g \quad (\text{M.4})$$

(b) reprezentarea prin sursă ideală de curent

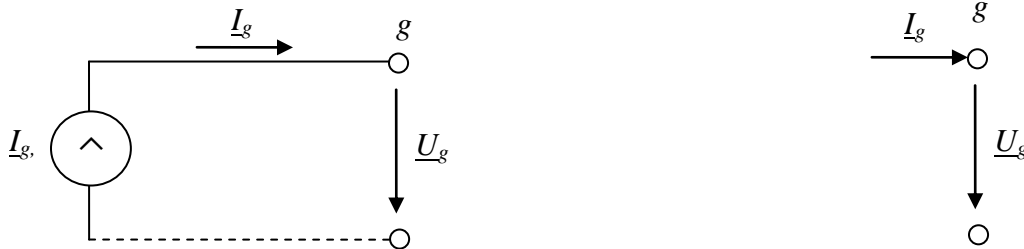


Fig. M.4 – Schema echivalentă completă și simplificată a GS reprezentat prin sursă ideal de curent


În această schemă, curentul sursei este egal cu curentul de sarcină al generatorului:

$$\underline{I}_g = \frac{\underline{S}_g^*}{\underline{U}_g^*} \quad (\text{M.5})$$

În calculele de regim permanent, nodurile generatoare sunt considerate de obicei, noduri de tip PU. Pentru ele se cunosc puterea activă generată, modulul tensiunii și limitele maximă și minimă ale puterii reactive generate, iar în urma calculului rezultă puterea reactivă a nodului și argumentul tensiunii nodale.

Exemplu

Ca o regulă generală, în ferestrele de introducere a datelor asociate oricărui tip de element (linie, transformator, generator) se pot introduce date pentru diverse tipuri de studii (regim permanent, regimuri de scurtcircuit, calcule de dimensionare, de fiabilitate etc). În cazul în care schema introdusă va fi folosită exclusiv pentru calcule de regim, este suficientă introducerea datelor menționate mai sus (puterea activă, factorul de putere și tensiunea nominală, reactanțele sincrone, dacă se iau în considerare, și limitele puterii reactive generate). De asemenea, pachetele de programe specializate de tipul Neplan, EDSA, Power Factory dispun de baze de date cu echipamente predefinite, care pot fi completate de către utilizatori cu echipamentele proprii. În Fig. M.5- M.X este indicată succesiunea pașilor ce trebuie îndepliniți pentru introducerea datelor de intrare ale unui generator în programul de calcul DIGSilent Power Factory (DIGPF). Pentru acest generator, s-au considerat limitele puterii reactive $Q_{min} = 10$ MVar și $Q_{max} = 40$ MVar și o putere activă generată la momentul calculului de $P_g = 30$ MW.

- Se conectează într-un nod al schemei un generator sincron, folosind pictograma  din bara de unelte a programului (vezi Fig. M.2).
- Executând **dublu click** pe simbolul introdus, ori **click dreapta > Edit data**, apare fereastra asociată elementului.

În această fereastră, trebuie indicat numele generatorului (**Name**) și tipul (**Type**) DIGPF permite folosirea unui tip predefinit, inclus în baza de date implicită a programului (**Select Global Type** - alege un tip global, predefinit), sau a unui tip definit de utilizator (**Select Project Type** – alege un tip definit de utilizator în schema curentă). Dacă se dorește utilizarea unui generator care nu există în baza de date, se va defini de către utilizator un tip nou. **Calculul de regim nu va funcționa dacă măcar un singur element din rețea nu are asociat un tip corect definit.** Parametrii electrici fundamentali ai echipamentului (de pildă P_n sau $\cos\phi_n$) sunt preluați și folosiți de către program din tipul acestuia.

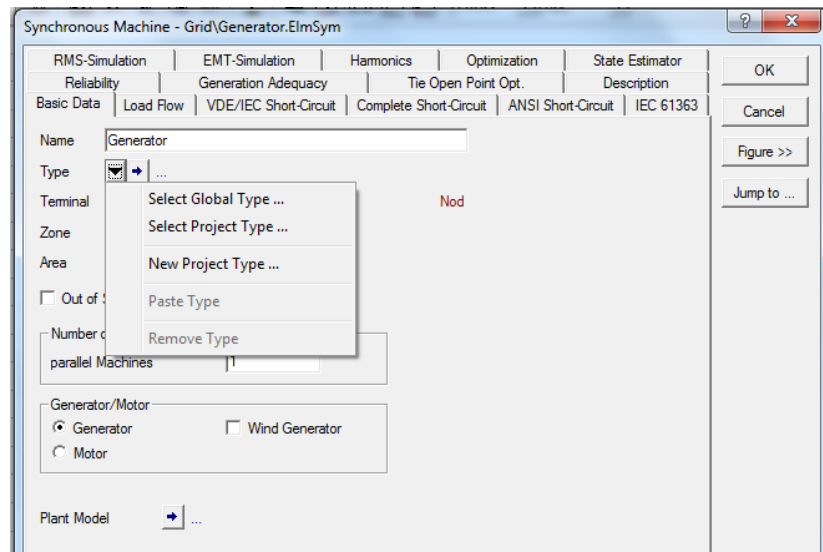


Fig. M.5 – Fereastra principală de introducere a datelor pentru un generator în programul DIGSilent Power Factory

- Pentru acest exemplu, se alege un tip global, din lista de generatoare disponibile în program:

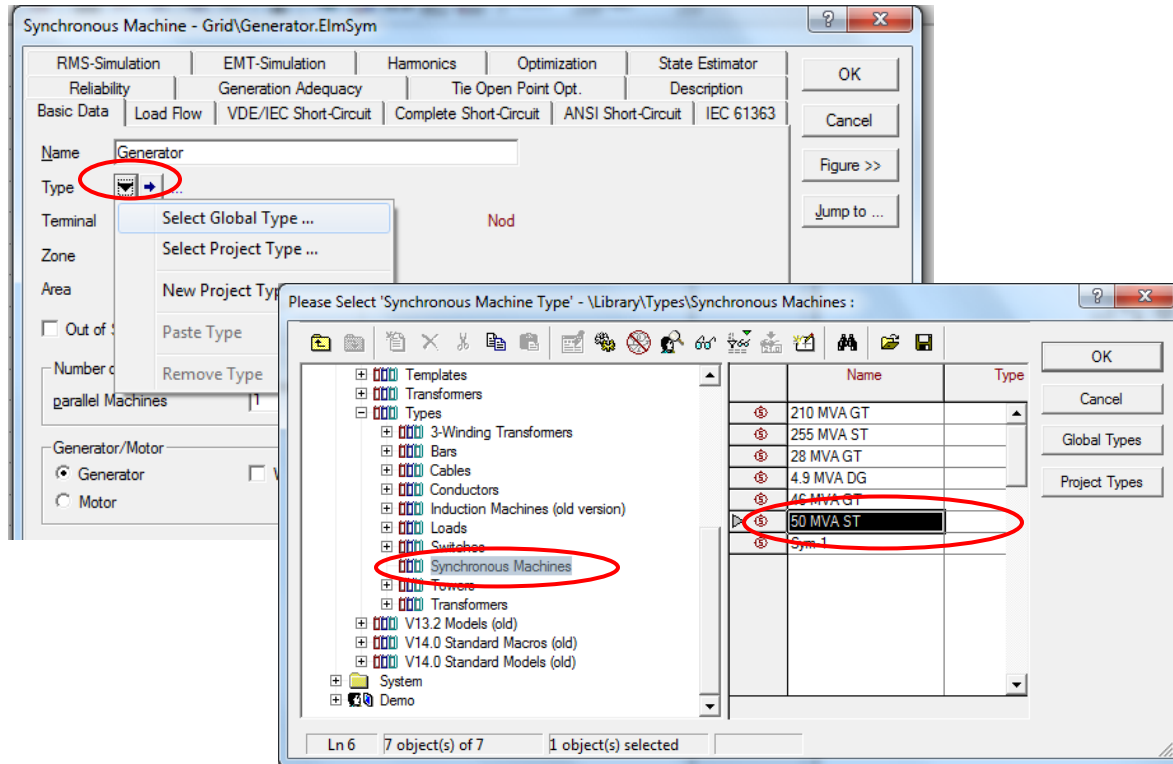


Fig. M.6 – Alegerea tipului unui generator în programul DIGSilent Power Factory

- Parametrii nominali ai generatorului pot fi vizualizați în ferestrele de date asociate tipului. Dacă tipul folosit este unul predefinit (Global), parametrii nu pot fi modificați (sunt read-only) Fig. M.7 – M.8 arată că generatorul ales are tensiunea nominală $U_n = 10,5$ kV, factorul de putere nominal $\cos\varphi_n=0.8$ și reactanța sincronă longitudinală $x_d = 2.54$ u.r.

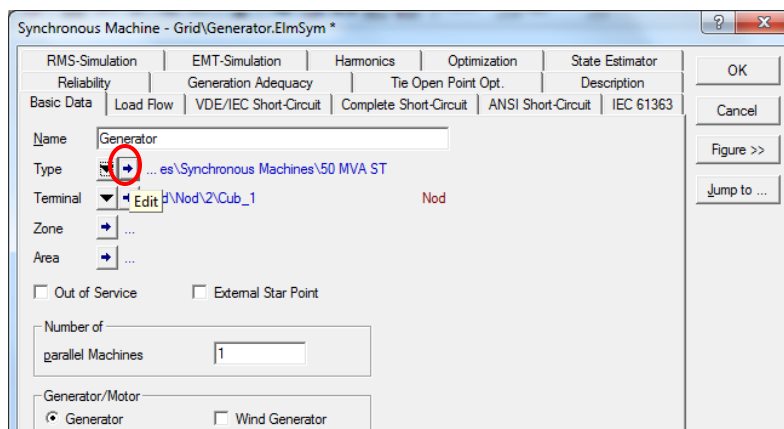


Fig M.7 Accesarea datelor nominale ale unui generator prin intermediul tipului acestuia

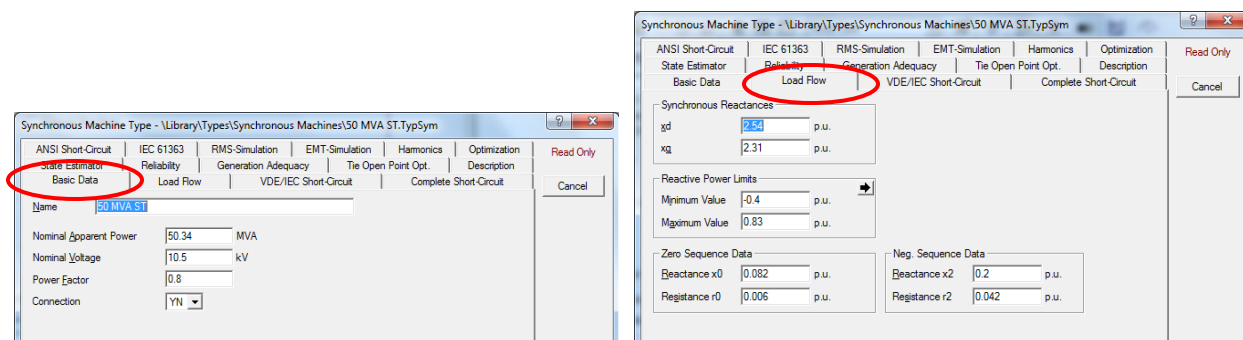
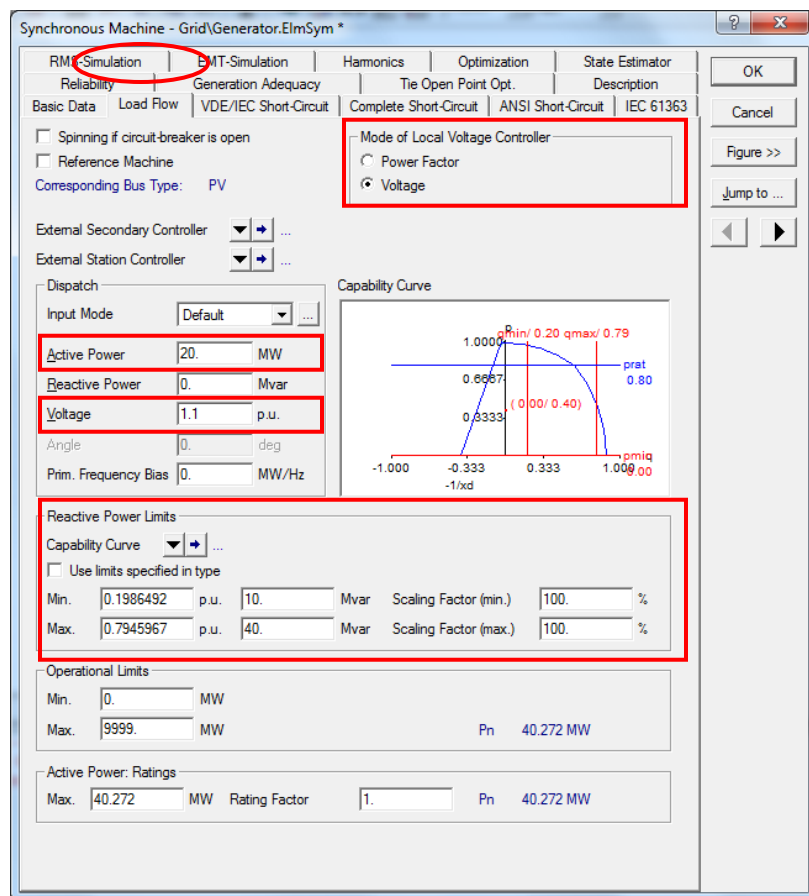


Fig. M.8 – Parametrii electrici nominali ai tipului unui generator sincron.

- În final, pentru folosirea generatorului ca nod PU, trebuie indicate în fereastra sa principală de date (prezentată în fig M.7 și M.9) tipul de reglaj prin tensiune, tensiunea impusă în nod, limitele maximă și minimă de putere activă și reactivă și puterea activă generată în regimul permanent studiat.



S-au ales:

- Mode of Local Voltage Controller: Voltage
- Active Power: 20 MW
- Voltage: 1.1 p.u. (=1.1*10,5 kV)
- Reactive Power Limits Min 10 Mvar, Max. 40 MVar

Fig. M.9 – Folosirea unui generator sincron ca nod PU

În Fig. M.10 este exemplificată folosirea unui generator de tip predefinit ca nod PU în programul Neplan.

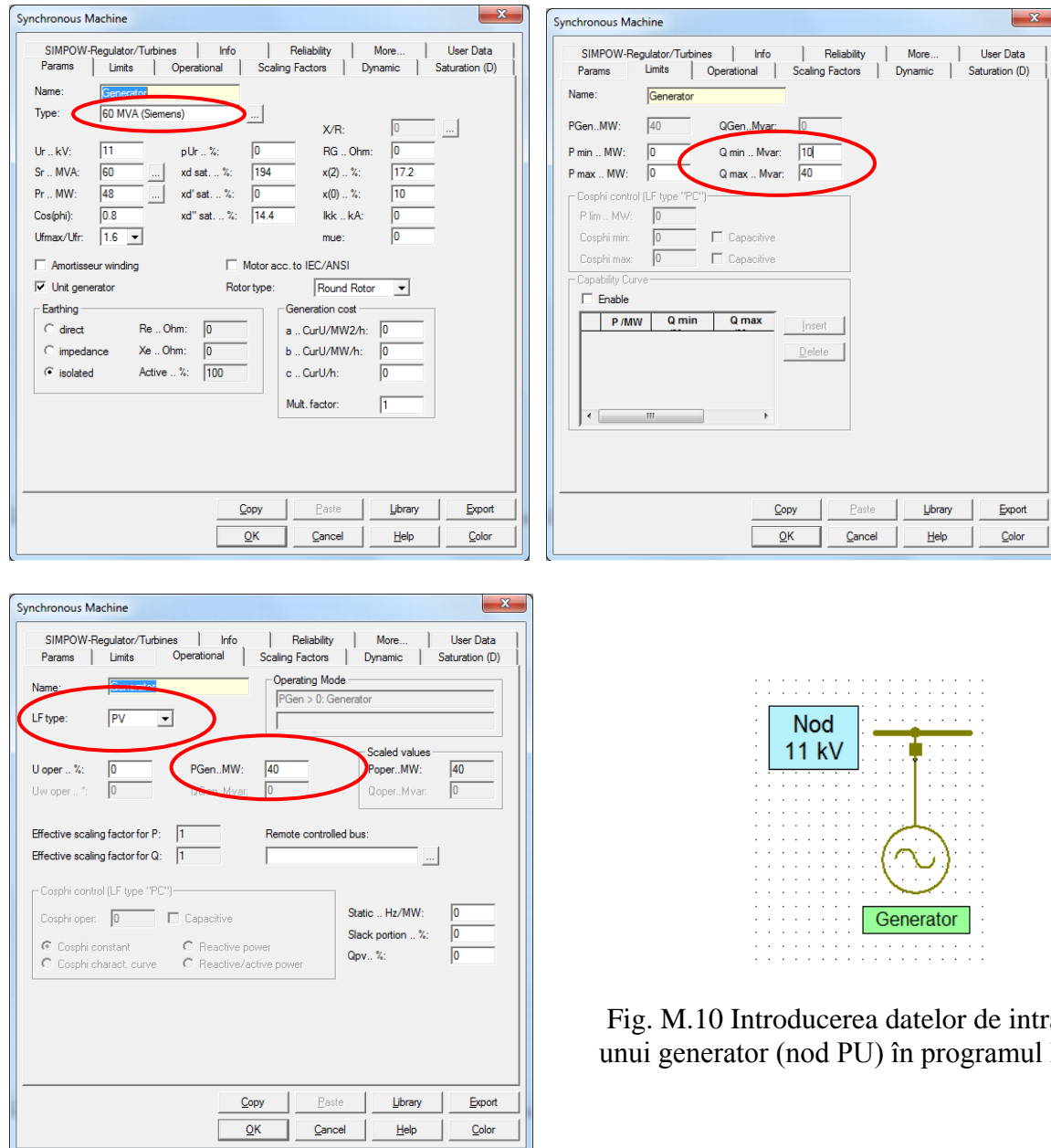


Fig. M.10 Introducerea datelor de intrare ale unui generator (nod PU) în programul Neplan

3.2. Reprezentarea sarcinilor

Când vorbim despre sarcina din nodurile SEE, ne referim la sarcina complexă, alcătuită din puterile absorbite de toți consumatorii, de diferite tipuri, racordați în nod.

Reprezentare grafică:

Fig. M.11 prezintă reprezentarea grafică în schemele monfilare a sarcinii electrice, în programele Neplan (a) și DIGSilent Power Factory (b).



Fig. M.11 – Reprezentarea sarcinilor în programele Neplan (a) și DIGSilent Power Factory

Reprezentare matematică:

În condiții normale de funcționare, când nu există deficit de putere activă sau reactivă, iar nivelul tensiunilor și al frecvenței în rețea sunt apropiate de cele nominale, sarcinile se modelează prin valori constante (curenți sau puteri):

$$\begin{aligned} P_s &= const \\ Q_s &= const \end{aligned} \quad (M.6)$$

Reprezentări alternative ale sarcinii:

❖ prin sursă de curent:

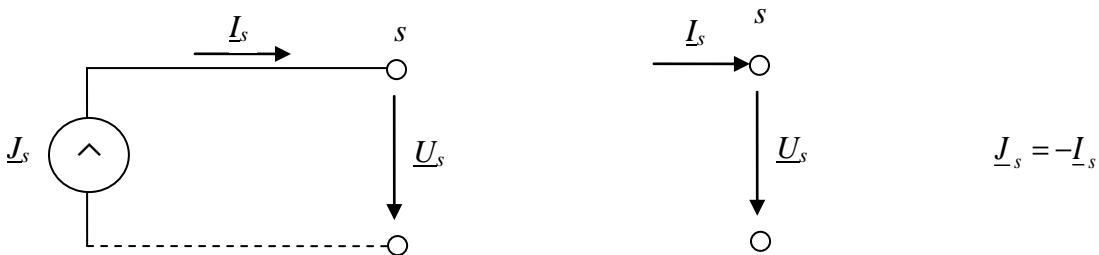


Fig. M.12 – Schema echivalentă completă și simplificată a sarcinii reprezentate prin sursă ideal de curent

Convențional, se folosește semnul (+) pentru injecții și semnul (-) pentru sarcini.

❖ prin impedanță:

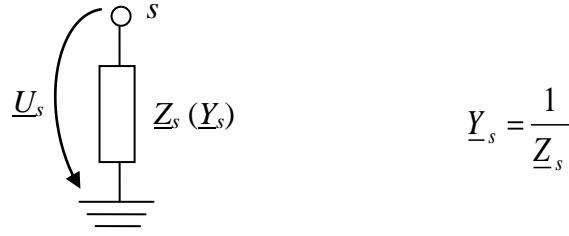


Fig. M.13 – Reprezentarea sarcinilor prin impedanță

În anumite regimuri de funcționare, cu deficit de putere activă și reactivă, se folosesc caracteristicile statice ale sarcinii:

$$\begin{aligned} P_s(U, f) \\ Q_s(U, f) \end{aligned} \quad (M.7)$$

Caracteristicile statice reflectă variațiile puterii consumate la variațiile lente ale tensiunii și frecvenței, specifice funcționării în regim staționar.

Frecvența este un parametru atent controlat în SEE, ea situându-se la valoarea nominală sau una foarte apropiată de aceasta. În aceste condiții, interesează în mod deosebit caracteristicile în funcție de tensiune, parametru care variază în limite mai largi. Un model des folosit este cel polinomial de gradul doi:

$$\begin{aligned} P_{s*} &= a_p \cdot U_*^2 + b_p \cdot U_* + c_p \\ Q_{s*} &= a_q \cdot U_*^2 + b_q \cdot U_* + c_q \end{aligned} \quad (M.8)$$

cu $P_{s*} = \frac{P_s}{P_{s0}}$; $Q_{s*} = \frac{Q_s}{Q_{s0}}$; $U_* = \frac{U}{U_n}$, unde P_{s0} și Q_{s0} sunt puterile consumate la tensiunea nominală U_n a nodului de sarcină.

Coeficienții polinoamelor din (M.8) trebuie să satisfacă relațiile:

$$P_{s*} = a_p + b_p + c_p = a_q + b_q + c_q = 1 \quad (M.9)$$

și trebuie actualizați periodic, în funcție de schimbările ce apar în structura sarcinii complexe din nod.

Uneori, se folosesc și modele exponențiale de forma:

$$P_{s*} = U_*^{k_{PU}} \quad Q_{s*} = U_*^{k_{QU}} \quad (M.10)$$

în care $k_{PU} \in (0, 2)$, $k_{QU} \in (1, 6)$, în funcție de structura sarcinii.

O pondere importantă din sarcina totală, în jur de 50%, aparține motoarelor asincrone. Există situații în care aceasta este tratată separat.

Exemplu

Definirea datelor de intrare ale unei sarcini $P_s=17$ MW și $Q_s=8$ MVar în programele DIGSilent Power Factory și Neplan este indicată în Fig. M.14 și M.15.

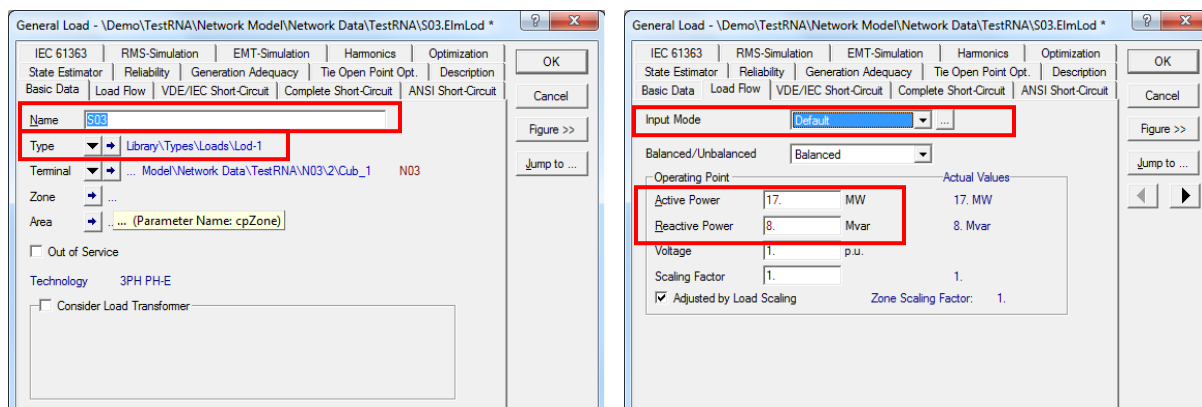


Fig. M.14 – Definirea unei sarcini în programul DigSilent Power Factory

În DIGSilent Power Factory, trebuie definite obligatoriu numele (**Name**), tipul (**Type**) și valoarea sarcinii. De obicei, se folosesc sarcini echilibrate pe cele trei faze (**Balanced**), iar dacă se preferă modul implicit (**Default**) de introducere a sarcinii, trebuie specificată puterea activă (**Active Power**) și reactivă (Reactive Power) consumate.

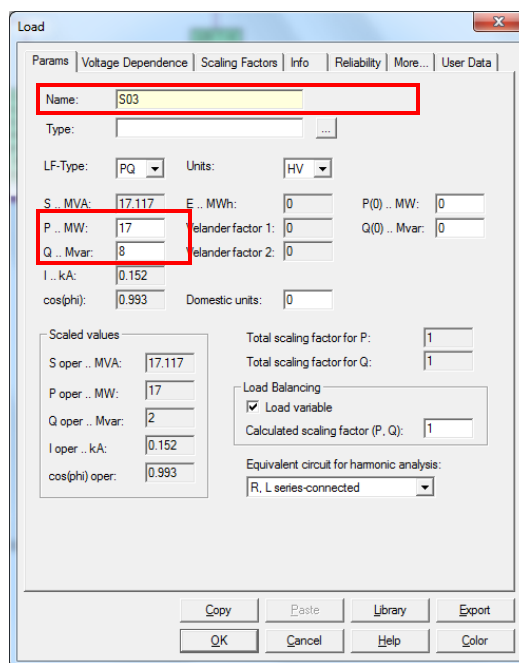


Fig. M.15 – Definirea unei sarcini în programul Neplan

3.3. Reprezentarea liniilor electrice

Reprezentare grafică

Fig. M.16 și ilustrează reprezentarea grafică a unei linii electrice în programele Neplan (a) și DIGSilent Power Factory (b). Linia N01-N02 s-a definit între două noduri, N01 și N02.

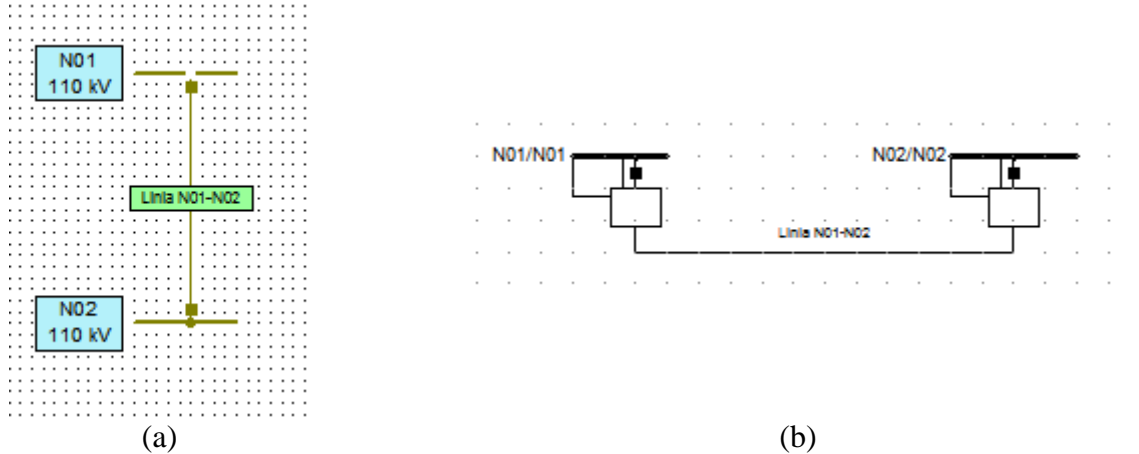


Fig. M.16 – Reprezentarea liniilor electrice în programele Neplan (a) și DIGSilent Power Factory (b)

Parametri introduși în programele de calcul

Pentru calculul regimului permanent, este necesară specificarea următorilor parametri ai liniilor electrice aeriene (LEA) și subterane (LES):

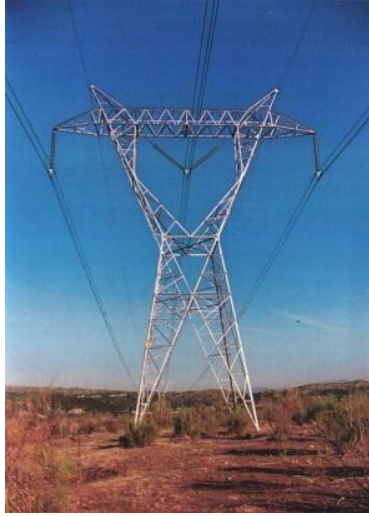
- Rezistența specifică (lineică, pe lungimea de 1 km) r_0 [Ω/km]
- Reactanța specifică x_0 [Ω/km]
- Conductanța specifică g_0 [S/km]
- Susceptanța specifică b_0 [Ω/km]
- Numărul de circuite în paralel n_c
- Lungimea liniei l [km]

Pe baza acestor valori, se calculează parametrii globali ai liniei, impedanța longitudinală și admitanța transversală:

$$\begin{aligned}\underline{z} &= l \cdot (r_0 + j \cdot x_0) / n_c \\ \underline{y} &= l \cdot (g_0 + j \cdot b_0) \cdot n_c\end{aligned}\tag{M.11}$$

Valorile parametrilor specifici ai liniilor depind de secțiunea transversală și materialul conductoarelor. Ei se preiau din cataloage de specialitate (caz în care au fost măsurați de producător) sau măsurători directe. Majoritatea liniilor se construiesc cu un circuit sau cu două circuite în paralel, dar există și tipuri constructive de linii cu mai multe circuite în paralel (Fig. M.17).

Notă: Calculul parametrilor rezistență, reactanță, conductanță și susceptanță este tratat pe larg în cursul de Transportul și Distribuția Energiei Electrice.



(a)



(b)

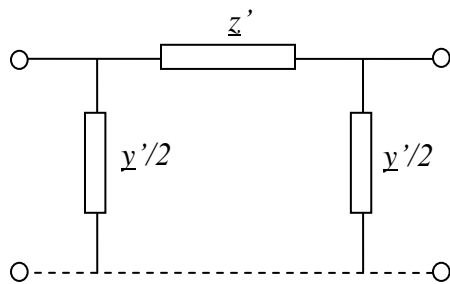


(c)

(a) LEA 400 kV cu un circuit; (b) LEA 220 kV cu două circuite;
(c) LEA 110 kV cu patru circuite

Modelare matematică

În programele de calcul al regimului permanent, liniile electrice se reprezintă prin elemente de circuit cu parametri uniform repartizați pe lungime. Cel mai des, se utilizează schema echivalentă în π simetrică (Fig. M.18), ai cărei parametri se determină în funcție de parametrii globali ai liniei, folosind relații de forma:



$$\begin{aligned}\underline{z}' &= \underline{z} \cdot \underline{k}_z \\ \underline{y}' &= \underline{y} \cdot \underline{k}_y\end{aligned}\quad (\text{M.12})$$

Fig. M.18 – Schema echivalentă cu parametri concentrați în π a unei linii electrice

\underline{k}_z și \underline{k}_y sunt coeficienți de corecție (coef. lui Kennelly) Pentru LEA cu lungimi de până la 250 km și LEC cu lungimi de până la 50 km, se admit aproximațiile $\underline{k}_z = \underline{k}_y = 1$. Pentru LEA cu lungimi între 250 și 1000 km, coeficienții lui Kennelly se aproximează astfel:

$$\underline{k}_z \approx 1 + \frac{\underline{z} \cdot \underline{y}}{6}, \quad \underline{k}_y \approx \frac{1 + \frac{\underline{z} \cdot \underline{y}}{12}}{1 + \frac{\underline{z} \cdot \underline{y}}{6}} \quad (\text{M.13})$$

Pentru linii de lungimi mai mari, se folosesc valorile exacte ale coeficienților k_x și k_y . (vezi curs TDEE) sau mai mulți cuadripoli conectați în lanț.

De regulă, în calculele de regim se neglijează parametrul conductanță, b. Valorile acestui parametru se vor considera doar în cazul LES cu tensiuni mai mari de 110 kV.

De cele mai multe ori, în calculele practice se folosește cuadripolul în π în care toate laturile sunt reprezentate prin admitanțe. În Fig. M.19 și relațiile M.14 – M.15 sunt indicate schema monofilară echivalentă și relațiile de calcul ale acestuia, în care parametrii r_{ik} , x_{ik} , b_{ik} sunt aceiași cu cei din relația M.12:

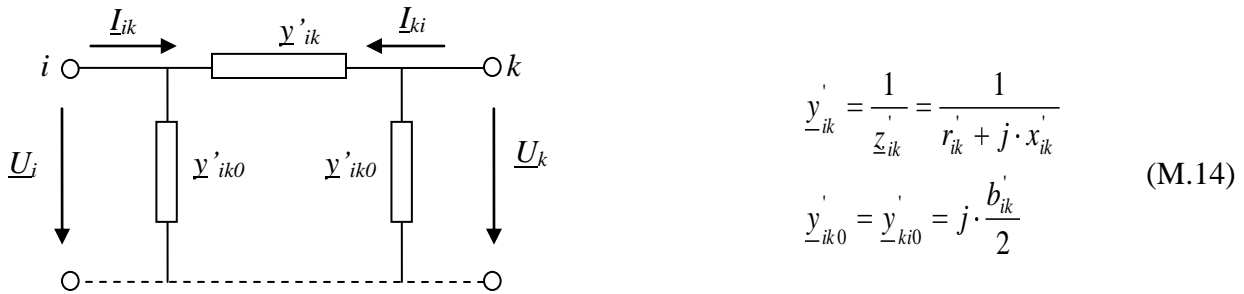


Fig. M.18 – Schema echivalentă cu parametri concentrați în π a unei linii electrice

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_{ik} \\ \underline{I}_{ki} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{y}_{ik} + \underline{y}_{ik0} & -\underline{y}_{ik} \\ -\underline{y}_{ik} & \underline{y}_{ik} + \underline{y}_{ik0} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{U}_i \\ \underline{U}_k \end{bmatrix} \quad (M.15)$$

Exemplu

Introducerea unei linii electrice într-o schemă monofilară, în programele DigSilent Power Factory și Neplan

La fel ca în cazul generatoarelor și sarcinilor, este obligatorie definirea tipului de linie folosit, fie alegându-l din baza de date a programului (Fig. M.19), fie definind un tip nou. Specific programului DIGSilent Power Factory este faptul că parametrii specifici ai liniilor electrice aeriene și în cablu sunt stocați în tipul conductorului (Fig. M.20). În fereastra de definiție a parametrilor liniei, vor trebui specificate apoi lungimea liniei, numărul de circuite în paralel și tipul liniei (LEA sau LES) (Fig. M.21). Programul alege implicit reprezentarea matematică a liniei prin cuadripoli în π (opțiunea Line Model)

În programul Neplan, nu este obligatorie folosirea unui tip anume de conductor. Se introduce în fereastra de definire a parametrilor numele liniei, lungimea, parametrii R, X, B, curentul limită termic, tipul LEA sau LEC (Fig. M.22).

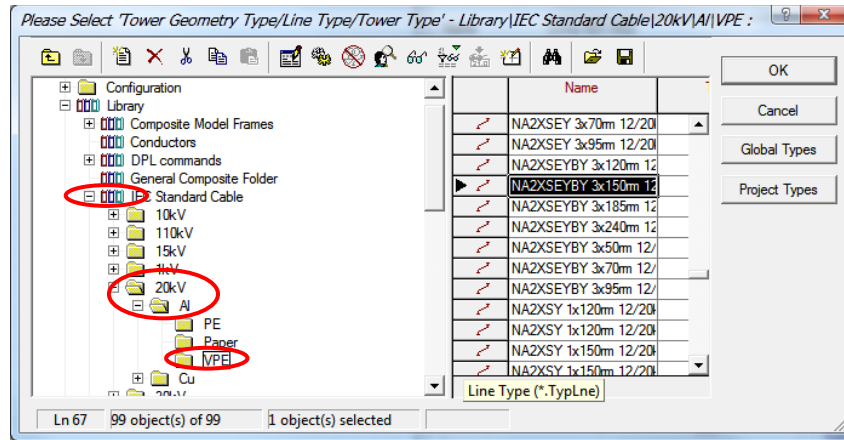


Fig. M.19 – Alegerea din baza de date a programului DIGSilent Power Factory a unui cablu trifazat cu pentru tensiune nominală 20 kV, cu conductor de aluminiu de secțiune transversală de 150 mm^2 și izolație de polietilenă reticulată

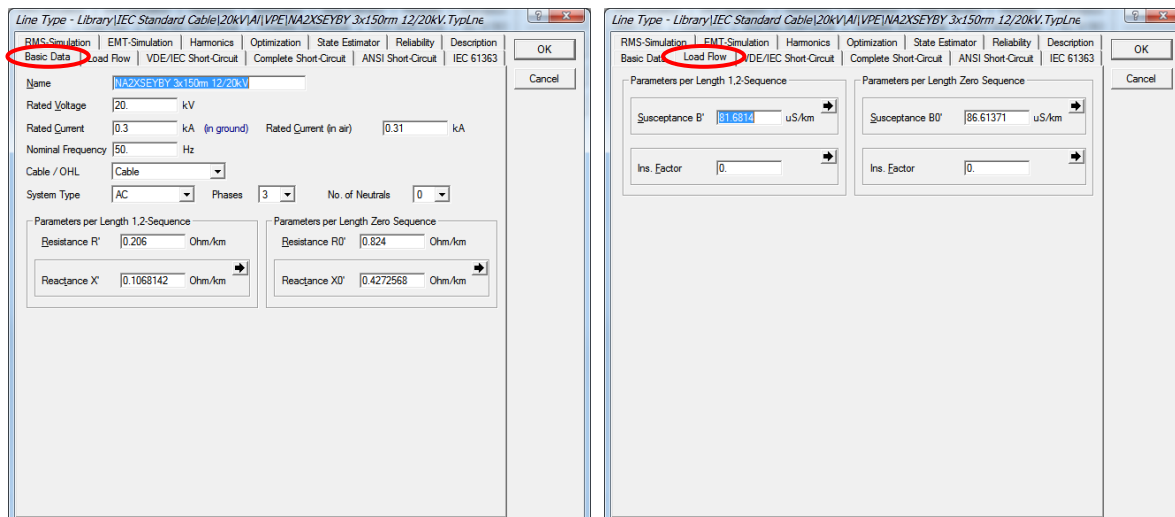


Fig. M. 20 – Parametrii de interes pentru tipul unei linii: nume (Name), tensiune nominală (Rated Voltage), tip LEA/LEC (OHL/Cable), curentul limită termic (Rated Current), frecvența nominală (Nominal Frequency), rezistență, reactanță, susceptanță (R' , X' , B'), tip c.a. /c.c. (AC/DC), numărul de faze (Phases), numărul de conductoare de neutru (No. of Neutrals)

Line - Grid/Linia N01-N02.EimLine *

RMS-Simulation | EMT-Simulation | Harmonics | Optimization | State Estimator | Reliability | Description

Basic Data | Load Flow | VDE/IEC Short-Circuit | Complete Short-Circuit | ANSI Short-Circuit | IEC 61363

Name: Linia N01-N02

Type: 20kV/VPE/VPE/NA2XSEBY 3x150m 12/20kV

Terminal i: Grid\N01\4\Cub_1

Terminal j: Grid\N02\1\Cub_1

Zone: Terminal i

Area: Terminal i

☐ Out of Service

Number of parallel Lines: 1

Parameters

Thermal Rating: ...

Length of Line: 1 km

Derating Factor: 1

Laying: Ground

Resulting Values

Rated Current	0.3 kA
Pos. Seq. Impedance, Z1	0.2220458 Ohm
Pos. Seq. Impedance, Angle	27.40744 deg
Pos. Seq. Resistance, R1	0.206 Ohm
Pos. Seq. Reactance, X1	0.1068142 Ohm
Zero Seq. Resistance, R0	0.824 Ohm
Zero Seq. Reactance, X0	0.4272568 Ohm
Earth-Fault Current, Ice	3.000387 A
Earth Factor, Magnitude	1
Earth Factor, Angle	0. deg

Type of Line: Cable

Line Model

☒ Lumped Parameter (PI)

☐ Distributed Parameter

Sections/Line Loads

Fig. M.21 – Parametri de interes pentru o linie electrică: Nume (Name), Tip (Type) Stare în serviciu/deconectată (Out of Service), numărul de circuite în parallel (Number of Parallel lines), lungime (Length of line).

Line

Params | Sections | Line Loads | Pylons | Compensation | Info | Reliability | More... | User Data

Name: Linia N01-N02

Type: ...

Length .. km: 10

Units: Ohm/km

R(1) .. Ohm/km: 0.206

X(1) .. Ohm/km: 0.106

C(1) .. uF/km: 0.25783

B(1) .. uS/km: 81

G(1) .. uS/km: 0

Ir max .. A: 0

Ir min .. A: 0

Reduction factor: 1

Operating Temp...°: 40

☒ Cable

☒ Switchable

☐ Overhead

Temp. at end of SC...°: 80

Number of lines: 1

Q .. mm2: 0

Copy | Paste | Library | Export

OK | Cancel | Help | Color

Fig. M.22 – Introducerea parametrilor unei linii în programul Neplan

3.4. Reprezentarea transformatoarelor

Transformatoarele utilizate în SEE pot fi de trei tipuri:

- cu două înfășurări
- cu trei înfășurări
- autotransformatoare

În cele ce urmează, se va prezenta în detaliu modelarea transformatorului cu două înfășurări, pentru cel cu trei înfășurări prezentându-se doar reprezentarea grafică și schemele echivalente.

Reprezentare grafică

Fig. M.23 și ilustrează reprezentarea grafică a unui transformator electric cu două înfășurări în programele Neplan (a) și DIGSilent Power Factory (b), definit între două noduri oarecare N01 și N02.

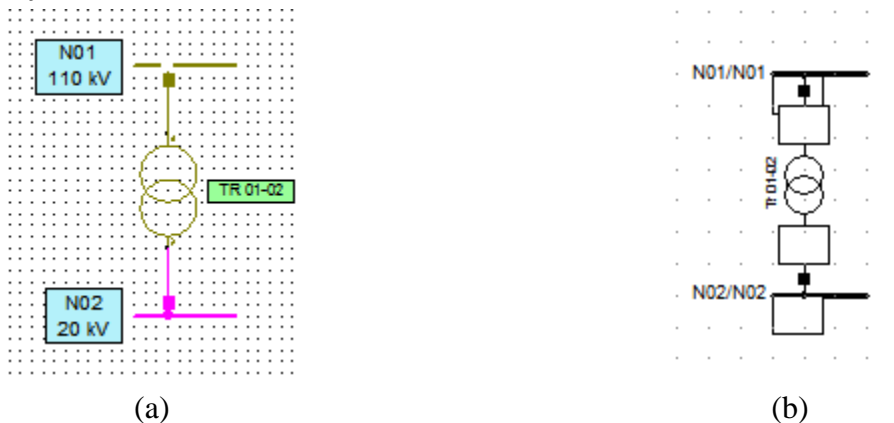


Fig. M.23 – Reprezentarea transformatoarelor cu două înfășurări în programele Neplan (a) și DIGSilent Power Factory (b)

Parametri introduși în programele de calcul

Pentru calculul regimului permanent, este necesară specificarea următorilor parametri de catalog ai transformatoarelor cu două înfășurări:

- Puterea aparentă nominală S_n [MVA]
- Tensiunea nominală a înfășurării de înaltă tensiune U_n^{IT} [kV]
- Tensiunea nominală a înfășurării de joasă tensiune U_n^{JT} [kV]
- Tensiunea de scurtcircuit u_{sc} [%]
- Curentul de mers în gol i_o [%]
- Pierderi de putere activă în sarcină (în înfășurări, la scurtcircuit) ΔP_{sc} [kW]
- Pierderi de putere activă la mers în gol (în miez, în fier) ΔP_0 [kW]
- Numărul de prize de reglaj (ploturi) și pasul de variație al tensiunii între două prize succesive
- Tipul și grupa de conexiuni a înfășurărilor (stea, triunghi, zig-zag)

Pornind de la aceste date și alegând una dintre tensiunile nominale ca mărime de raportare – notată în continuare U_n – cei patru parametri electrici ai transformatorului cu două înfășurări se calculează cu relațiile:

$$\begin{aligned} R_T &= \frac{\Delta P_{sc} \cdot U_n^2}{S_n^2} \cdot 10^{-3} \quad [\Omega] & X_T &= \frac{u_{sc} \cdot U_n^2}{100 \cdot S_n} \quad [\Omega] \\ G_T &= \frac{\Delta P_{Fe}}{U_n^2} \cdot 10^{-3} \quad [S] & B_T &= \frac{i_0 \cdot S_n}{100 \cdot U_n^2} \quad [S] \end{aligned} \quad (M.16)$$

Unele programe de calcul, precum EDSA, solicită ca date de intrare direct acești parametri globali.

În funcție de sensul normal de curgere al puterii prin transformator, celor două înfășurări ale transformatorului li se asociază denumirile de primar și secundar. Atunci când înfășurarea primară este cea de înaltă tensiune, transformatorul este *coborător*, iar când înfășurarea primară este cea de joasă tensiune, transformatorul este unul *ridicător*.

Model matematic

Transformatoarele și autotransformatoarele trifazate folosite în SEE se reprezintă în calculele de regim permanent prin scheme echivalente cu parametri raportați la una dintre înfășurări și un transformator ideal (două în cazul transformatoarelor cu trei înfășurări) conectate în partea înfășurărilor raportate, caracterizate prin rapoarte de transformare cu valori în general complexe.

Pentru simplificarea calculelor, se recomandă ca raportarea să se facă la tensiunea nominală a înfășurării nereglate (de regulă, înfășurarea de JT). În caz contrar, parametrii din relația (M.16) ar trebui recalculați de fiecare dată când are loc schimbarea raportului de transformare.

Cea mai frecventă reprezentare a transformatoarelor în calculele de regim folosește schema echivalentă în Γ , care conține în ramura longitudinală impedanța de scurtcircuit \underline{Z} alcătuită din rezistența R_T și reactanța X_T , iar în ramura transversală, admitanța de magnetizare \underline{Y} caracterizată de conductanța G_T și susceptanța B_T (Fig. M.24). Pe ramura longitudinală, e înseriat un transformator ideal, caracterizat de raportul de transformare \underline{N} , număr complex, al cărui modul N se calculează ca raportul dintre tensiunile de la bornele celor două înfășurări în regim de mers în gol, și al cărui argument θ este determinat de grupa de conexiuni a transformatorului:

$$\underline{N} = N \cdot e^{j\theta} \quad (M.17)$$

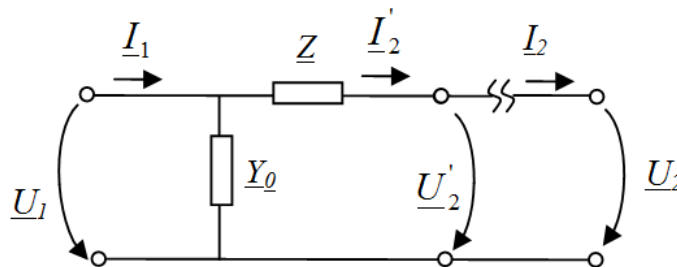


Fig. M.24 – Schema echivalentă în Γ a transformatorului cu două înfășurări

De exemplu, pentru grupa de conexiuni 12 (Yy-12 sau Dd-12), defazajul θ este nul.

În cazul transformatorului Y₀d-11, tensiunea între două borne de fază ale înfășurării de înaltă tensiune este defazată cu $11 \cdot \pi/6$ înainte sau cu $\pi/6$ în urmă față de tensiunea între bornele analoage ale înfășurării de joasă tensiune.

Raportul real de transformare se definește ca raportul dintre tensiunea înfășurării nereglate și tensiunea înfășurării reglate:

$$N = \frac{U^{ner}}{U^{reg}} \quad (M.18)$$

Tensiunea înfășurării reglate depinde de plotul curent de funcționare al transformatorului:

$$U^{reg} = U_n^{reg} \left[1 + (w_n - w) \cdot \frac{\Delta U}{100} \right] \quad (M.19)$$

unde U_n^{ner}, U_n^{reg} - tensiunile nominale ale înfășurărilor reglată și nereglată; w - plotul de funcționare; w_n - plotul nominal; ΔU - valoarea procentuală a treptei de reglare. Valorile U_n^{ner} și U_n^{reg} corespund funcționării pe plotul nominal, w_n , care este în același timp și plot median, în timp ce valoarea U^{reg} corespunde funcționării pe plotul w .

De obicei, numărul ploturilor de reglaj în cele două sensuri este același, p , și dacă se consideră și plotul median, rezultă un număr total de $2p+1$ ploturi. Numerotarea ploturilor se face de la $w_{min} = 1$, corespunzător numărului maxim de spire, trecând prin plotul nominal $w_n = p+1$ și până la $w_{max} = 2p+1$, corespunzător numărului minim de spire pe înfășurarea reglată. În aceste, tensiunea la gol la bornele înfășurării reglate poate varia între limitele:

$$\begin{aligned} U_{max}^{reg} &= U^{reg}(w_{min}) = U_n^{reg} \left(1 + p \cdot \frac{\Delta U}{100} \right) \\ U_{min}^{reg} &= U^{reg}(w_{max}) = U_n^{reg} \left(1 - p \cdot \frac{\Delta U}{100} \right) \end{aligned} \quad (M.20)$$

În funcție de tipul transformatorului (ridicător sau coborător), schema echivalentă în Γ și ecuațiile de funcționare se particularizează conform Fig. M.25 și M.26 și relațiilor M.21 și M.22:

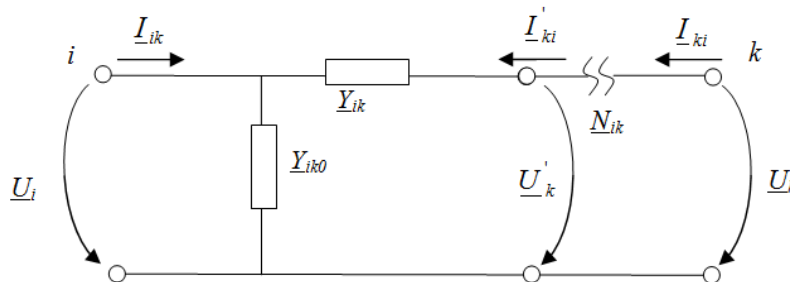


Fig. M.25 – Schema echivalentă în Γ a transformatorului ridicător

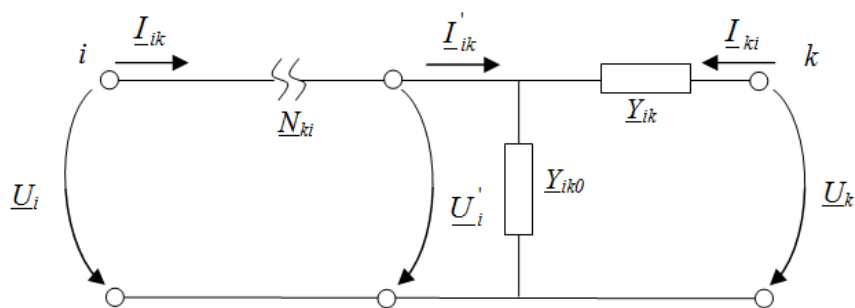


Fig. M.26 – Schema echivalentă în Γ a transformatorului coborător

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_{ik} \\ \underline{I}_{ki} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{y}_{ik} + \underline{y}_{ik0} & -\underline{N}_{ik} \cdot \underline{y}_{ik} \\ -\underline{N}_{ik}^* \cdot \underline{y}_{ik} & \underline{N}_{ik}^2 \cdot \underline{y}_{ik} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{U}_i \\ \underline{U}_k \end{bmatrix} \quad (\text{M.21})$$

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_{ik} \\ \underline{I}_{ki} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (\underline{y}_{ik} + \underline{y}_{ik0}) \cdot \underline{N}_{ki}^2 & -\underline{N}_{ki}^* \cdot \underline{y}_{ik} \\ -\underline{N}_{ki} \cdot \underline{y}_{ik} & \underline{y}_{ik} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{U}_i \\ \underline{U}_k \end{bmatrix} \quad (\text{M.22})$$

Pentru transformatorul cu trei înfășurări, abordarea este similară celei folosite în cazul transformatorului cu două înfășurări. Schema echivalentă a acestuia se indică în Fig. M.27.

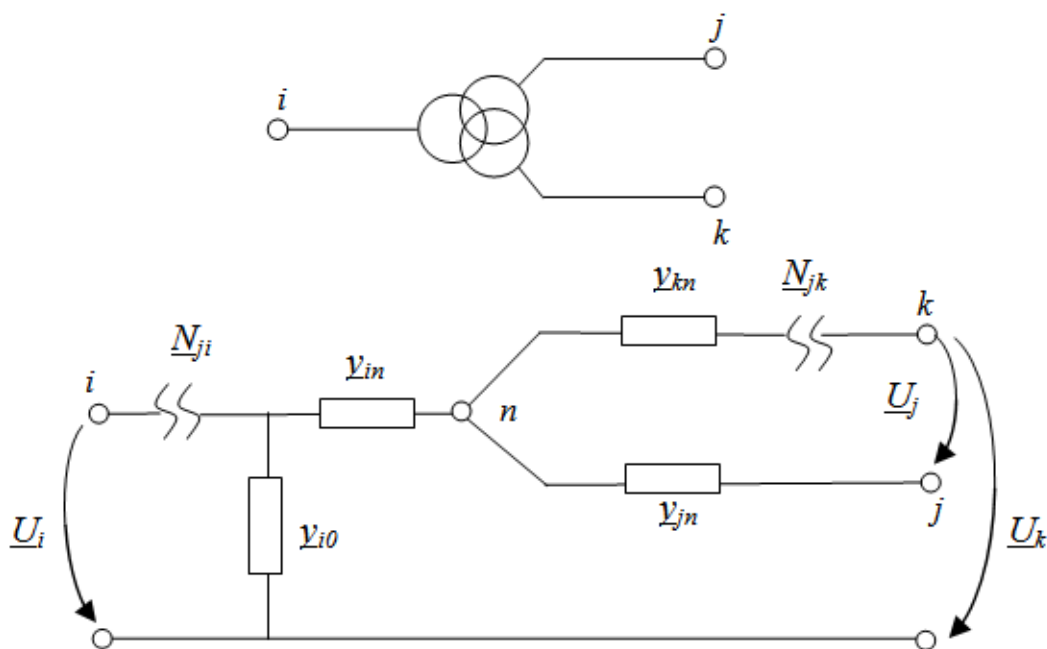


Fig. M.27 – Schema monofilară și cea echivalentă ale transformatorului cu trei înfășurări

Exemplu

Definirea în DIGSilent Power Factory și Neplan a unui transformator cu două înfășurări

Programul DigSilent Power Factory memorează în tipul transformatorului toate datele de catalog ale unui transformator (Fig. M.28). În fereastra de definiție a transformatorului, se precizează doar numele, starea activ-inactiv și plotul curent de funcționare al transformatorului (Fig. M.29).

În programul Neplan, transformatorul se definește mai simplu, nefiind nevoie de un tip asociat (Fig. M.30).

The image displays two side-by-side screenshots of the '2-Winding Transformer Type' dialog box in the DIGSilent Power Factory software. Both windows show the 'Basic Data' tab.

Left Window (Basic Data):

- Name: 25 MVA 20/10 kV
- Technology: Three Phase Transformer
- Rated Power: 25 MVA
- Nominal Frequency: 50 Hz
- Rated Voltage:
 - HV-Side: 20 kV
 - LV-Side: 10 kV
- Vector Group:
 - HV-Side: YN
 - LV-Side: D
- Phase Shift: 5 °30deg
- Short-Circuit Voltage uk: 10.3 %
- Copper Losses: 102.76 kW
- Zero Sequ. Impedance, Short-Circuit Voltage:
 - Absolute uk0: 9 %
 - Resistive Part ukR0: 0 %

Right Window (Load Flow):

- Tap Changer:
 - at Side: HV
 - Additional Voltage per Tap: 2.5 %
 - Phase of du: 0 deg
 - Neutral Position: 0
 - Minimum Position: -2
 - Maximum Position: 2
- Magnetizing Impedance:
 - No Load Current: 0.1 %
 - No Load Losses: 10.96 kW
- Tap dependent impedance: (checkbox unchecked)

Fig. M.28 – Parametrii definiți în tipul unui transformator cu două înfășurări în programul DIGSilent Power Factory: nume (Name), putere aparentă nominală (Rated Power), tensiunile nominale ale înfășurărilor de înaltă (HV – high voltage) și joasă (LV – low voltage) tensiune (Rated Voltage), tensiunea de scurtcircuit (Short-circuit voltage uk), pierderile de putere activă în sarcină sau în cupru (Copper Losses), grupa de conexiuni (Vector Group), numărul și pasul ploturilor (Tap Changer), curentul de mers în gol (No Load Current) și pierderile de putere activă în fier sau la mers în gol (No Load Losses)

