



Seria: Wykłady

Systemy elektroenergetyczne

Wykład 21

Obliczanie stanów sieci średniego napięcia przy niesymetrycznym obciążeniu

Autor:

**dr inż. Zbigniew Zdun
mgr inż. Tomasz Zdun**

Warszawa, 2022

Spis treści

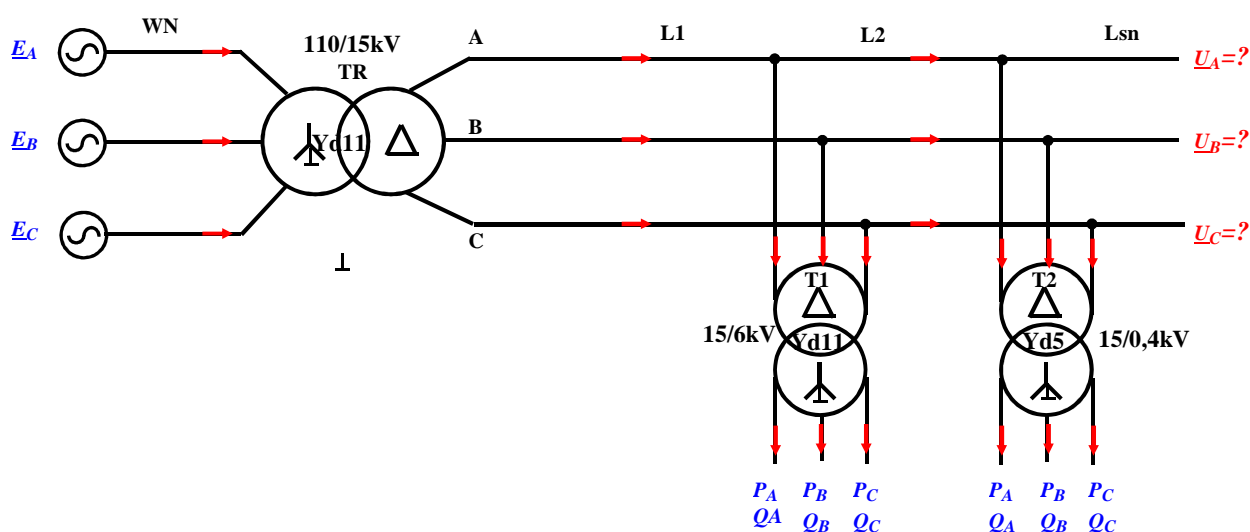
1.	Metoda obliczania sieci średniego napięcia.....	4
1.1.	Schemat zastępczy sieci średniego napięcia.....	6
1.2.	Metoda potencjałów węzłowych do obliczeń sieci średniego napięcia	7
1.3.	Napięcia początkowe w sieci średniego napięcia.....	8
1.4.	Obliczanie prądów odbiorów	9
1.5.	Obliczanie napięć węzłowych	10
1.6.	Obliczanie napięć wynikowych w układzie przesyłowym.....	11
1.7.	Obliczanie rozptywu mocy w sieci średniego napięcia.....	12
1.7.1.	Przepływ mocy w linii $L2$	12
1.7.2.	Przepływ mocy w linii $L1$	13
1.7.3.	Przepływ mocy w transformatorze TR	14
1.7.4.	Przepływ mocy w linii WN 110 kV	15
2.	Przykład obliczeń sieci średniego napięcia pakietem Plans.....	16
3.	Przykład obliczeń - stan symetrycznego obciążenia.....	17
3.1.	Dane do obliczeń – impedancje elementów	17
3.2.	Dane do obliczeń – napięcia zasilające w kroku pierwszym	18
3.3.	Dane do obliczeń – odbiory w kroku pierwszym.....	19
3.4.	Obliczenia iteracyjne	21
3.5.	Obliczenie napięć transformatorów $T1, T2$, po pierwszej iteracji	24
3.6.	Korekcja prądów – odbiorów po pierwszej iteracji.....	25
3.7.	Nowe napięcia i prądy węzłowe.....	26
3.8.	Obliczanie napięć i prądów wynikowych w układzie przesyłowym.....	27
3.8.1.	Obliczenia dla transformatora $T2$	27
3.8.2.	Obliczenia dla transformatora $T1$	28
3.8.3.	Obliczenia dla transformatora TR	29
3.9.	Obliczenia rozptywu prądów i mocy.....	30
3.9.1.	Obliczanie prądów i mocy w linii $L2$	30
3.9.2.	Obliczanie prądów i mocy w linii $L1$	31
3.9.3.	Obliczanie prądów i mocy w transformatorze TR	32
3.9.4.	Obliczanie prądów i mocy w linii 110 kV (WN).....	33
3.10.	Podsumowanie	34
4.	Przykład obliczeń - stan niesymetrycznego obciążenia układu (asym).....	35
4.1.	Dane do obliczeń – impedancje elementów i napięcia początkowe (asym)	35
4.2.	Dane do obliczeń – odbiory (asym)	36
4.3.	Obliczenia iteracyjne (asym).....	37
4.4.	Obliczenie napięć transformatorów $T1, T2$, po pierwszej iteracji (asym)	38

4.5.	Korekcja prądów odbiorów po iteracji 1 (asym)	39
4.6.	Nowe napięcia i prądy węzłowe po iteracjach (asym)	40
4.7.	Obliczanie napięć wynikowych w układzie przesyłowym (asym).....	41
4.7.1.	Obliczenia dla transformatora T2	41
4.7.2.	Obliczenia dla transformatora T1 (asym).....	42
4.7.3.	Obliczenia dla transformatora TR (asym)	43
4.8.	Obliczenia rozplywu prądów i mocy (asym).....	44
4.8.1.	Obliczanie prądów i mocy w linii L2 (asym).....	44
4.8.1.	Obliczanie prądów i mocy w linii L1 (asym).....	45
4.8.2.	Obliczanie prądów i mocy w transformatorze TR (asym)	46
4.8.1.	Obliczanie prądów i mocy w linii 110 kV (WN) (asym)	47
5.	Wyniki obliczeń przy obciążeniu symetrycznym.....	48
6.	Wyniki obliczeń przy obciążeniu niesymetrycznym.....	49
7.	Wyniki obliczeń przy gwiazdowym układzie połączeń uzwojeń transformatorów	50
8.	Wyniki obliczeń przy obciążeniu jednej fazy.....	51
9.	Wyniki przy asymetrii linii średniego napięcia.....	52
10.	Wyniki przy zasilaniu asymetrycznym	53
11.	Wyniki – przerwa w fazie A linii WN.....	54
12.	Wyniki przy zwarciu fazy B w linii WN.....	55
13.	Podsumowanie.....	56

1. Metoda obliczania sieci średniego napięcia

Sieć średniego napięcia jest zasilana z sieci 110 kV z transformatorów 110kV/SN zainstalowanych w GPZ. Transformatory te zwykle mają układ połączeń: gwiazda uziemiona bądź nieziemiona po stronie 110 kV, a trójkąt po stronie sieci średniego, np. Yd11. Napięcie sieci SN jest zwykle 15kV. Sieć średniego napięcia zasilą odbiorców finalnych przez transformatory SN/nN.

Schemat fazowy takiego układu przedstawia (Rys. 1.1). Linia wysokiego napięcia 110 kV (WN) zasilą transformator TR (110/SN) do którego podłączone są szeregowo linia średniego napięcia L1, zasilająca odbiór T1, a drugi odcinek linii – linia L2 zasilą odbiór T2, trzeci odcinek Lsn ma znaczenie symboliczne.



Rys. 1.1. Schemat układu zasilania sieci średniego napięcia

Oznaczenia:

$\underline{E}_{A,B,C}$ – napięcia zasilające (faza A,B,C),

WN – linia wysokiego napięcia,

TR – transformator 110/SN o układzie Yd11,

A,B,C – oznaczenie faz: L1,L2,L3

L1 – pierwszy odcinek linii średniego napięcia,

L2 – drugi odcinek linii średniego napięcia,

Lsn – dalszy odcinek linii średniego napięcia,

T1,T2 – transformatory odbiorcze o układzie połączeń T1 – Yd11, T2 – Yd5.

Zadanie polega na wyznaczeniu napięć, rozplywu prądów i mocy dla różnych stanów pracy odbiorów – zarówno symetrycznych jak i niesymetrycznych, a również dla asymetrii elementów sieciowych, a także dla asymetrycznego zasilania. Sieć po stronie średniego napięcia pracuje z izolowanym punktem zerowym, zatem nie pojawi się prąd dla składowej zerowej, tak więc elementy sieciowe sieci SN mogą być odwzorowane impedancjami tylko dla składowej zgodnej i przeciwnej – o wartościach takich samych jak dla składowej zgodnej.

Odbiory finalne na poziomie sieci nN są podłączone do sieci nN pracującej z uziemionym punktem zerowym, i przy asymetrycznym obciążeniu pojawią się prądy dla składowej zerowej zgodnej i przeciwnej, ale transformatory SN/nN nie przenoszą składowej zerowej prądu do sieci SN z sieci nN. Natomiast składowa zgodna i przeciwna prądu transformują się do sieci SN, ale w zależności od układu połączeń transformatora SN/nN inaczej transformuje się składowa zgodna a inaczej składowa przeciwna.

Danymi do obliczeń są napięcia zasilające sieć 110 kV, parametry elektryczne elementów: linii 110 kV, transformatora 110/SN oraz linii SN, a także moce odbiorów w postaci mocy fazowych symetrycznych lub asymetrycznych, pobieranych przez odbiorców finalnych na poziomie sieci nN.

Pierwszym etapem obliczeń jest wyznaczenie napięć w sieci na podstawie prądów pobieranych przez odbiory finalne. Należy zauważyć, że dla zadanych mocy odbieranych nie można dokładnie wyznaczyć prądów, gdyż nieznane są napięcie w punktach przyłączenia odbiorów. Zadane jest napięcie zasilające, natomiast napięcie na odbiorach jest pomniejszone o straty napięć na elementach impedancyjnych sieci, a straty te zależą od prądów odbiorów, których w pierwszym kroku nie można dokładnie obliczyć. Należy więc w pierwszym kroku przyjąć 'dowolne' napięcia na odbiorach np. takie jak napięcia zasilające i obliczyć prądy odbiorów i wtedy można policzyć straty napięć na elementach sieci i skorygować napięcia na odbiorach i powtórzyć obliczenia. Trzeba kilkakrotnie te obliczenia powtórzyć, aż do momentu gdy nie będą występowały istotne zmiany napięć na odbiorach. Tak więc obliczanie napięć należy wykonywać w sposób iteracyjny. Po zakończeniu iteracji napięć można obliczyć rozptyły prądów i mocy

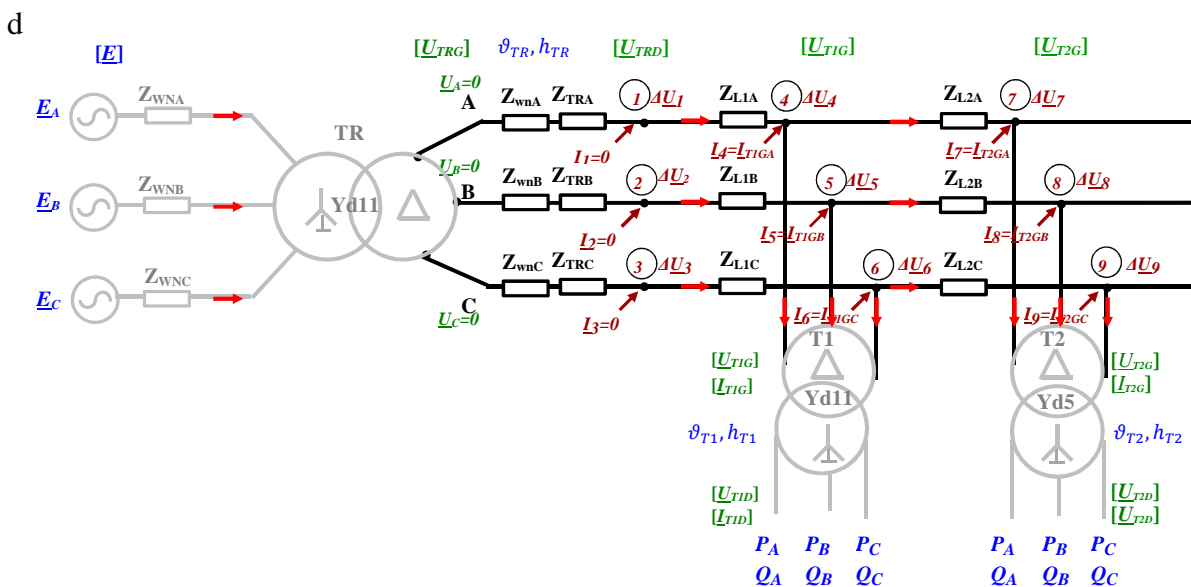
Metoda ta jest w opisie bardzo prosta, ale dla dużej sieci jest nie do zastosowania, wymaga bowiem głębokiej analizy topologicznej układu sieciowego.

Uniwersalną metodą rozwiązywania obwodów elektrycznych jest metoda potencjałów węzłowych, która polega na obliczeniu według prostych zasad macierzy admitancyjnej węzłowej, stanowiącą relację prądów węzłowych z napięciami węzłowymi.

Należy wziąć pod uwagę, że obliczenia dotyczą stanów sieci przy obciążeniach niesymetrycznych. Stany asymetryczne w obwodach trójfazowych rozwiązywane są metodą składowych symetrycznych – układ trójfazowy przedstawiany jest za pomocą trzech oddzielnych obwodów: dla składowej zerowej, zgodnej i przeciwnej. Ponieważ rozpatrywany układ sieci średniego napięcia pracuje z izolowanymi punktami zerowymi transformatorów to nie będą występowały składowe zerowe prądów i napięć, a obwód dla składowej zerowej może być pominięty. Natomiast przy asymetrycznym obciążeniu będą występować składowe zgodne i przeciwne prądów i napięć, tak więc trzeba brać pod uwagę obwód zastępczy dla składowej zgodnej i przeciwnej, ale wartości impedancji linii i transformatorów dla składowej zgodnej i przeciwnej są takie same. Tak więc można sporządzić jeden schemat zastępczy – tylko dla składowej zgodnej.

1.1. Schemat zastępczy sieci średniego napięcia

Dla układu sieciowego z (Rys. 1.1) należy sporządzić schemat zastępczy zawierający układ połączeń, impedancje elementów, napięcia i prądy. Należy więc obliczyć impedancje zastępcze: linii wysokiego napięcia, transformatora zasilającego 110kV/SN oraz dwóch odcinków linii średniego napięcia. Następnie impedancje te należy ‘sprowadzić’ do poziomu średniego napięcia – głównie impedancję linii 110 kV należy podzielić przez kwadrat przekładni transformatora ($\mathcal{G}_{TR} = U_{nTRG}/U_{nTRD}$). Dla transformatorów odbiorczych T1, T2 można pominąć impedancje przyjmując, że zadane są moce płynące przez te transformatory po stronie niskiego napięcia lecz za impedancjami tych transformatorów, (moce odbiorów powiększone o przybliżone wartości strat mocy). Należy natomiast uwzględnić przekładnię zwojową i godzinową tych transformatorów. Schemat taki przedstawia (Rys. 1.2). Na schemacie tym kolorem ‘szarym’ oznaczono te elementy, które nie biorą udziału w podstawowych obliczeniach iteracyjnych. Kolorem czerwonym oznaczono poszukiwane napięcia i prądy, natomiast kolorem zielonym oznaczone są wielkości, które będą brały udział w procesie iteracyjnym. Kolorem niebieskim oznaczone są stałe parametry – dane układu sieciowego.



Rys. 1.2. Schemat zastępczy układu do obliczeń

Na (Rys. 1.2) ponumerowane są węzły od 1 do 9, dla których będzie wyznaczona macierz admitancyjna węzłowa, a na jej podstawie będą wykonywane obliczenia iteracyjne.

1.2. Metoda potencjałów węzłowych do obliczeń sieci średniego napięcia

Metoda potencjałów węzłowych wymaga przyjęcia węzła odniesienia – węzła o napięciu zerowym. W tym przypadku należy przyjąć, że węzłem odniesienia będą węzły A,B,C zasilania obwodu zastępczego. Dane są prądy węzłowe i na podstawie równania $I = \underline{Y} \cdot \Delta U$ mogą być obliczone napięcia węzłowe – straty napięć na impedancjach sieci od węzła zasilania do danego węzła. Zatem równanie metody potencjałów węzłowych jest:

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_1=0 \\ \underline{I}_2=0 \\ \underline{I}_3=0 \\ \underline{I}_4=\underline{I}_{T1A} \\ \underline{I}_5=\underline{I}_{T1B} \\ \underline{I}_6=\underline{I}_{T1C} \\ \underline{I}_7=\underline{I}_{T2A} \\ \underline{I}_8=\underline{I}_{T2B} \\ \underline{I}_9=\underline{I}_{T2C} \end{bmatrix} = \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \\ 8 \\ 9 \end{matrix} \begin{bmatrix} \underline{Y}_{11} & 0 & 0 & \underline{Y}_{14} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \underline{Y}_{22} & 0 & 0 & \underline{Y}_{25} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \underline{Y}_{33} & 0 & 0 & \underline{Y}_{36} & 0 & 0 & 0 \\ \underline{Y}_{41} & 0 & 0 & \underline{Y}_{44} & \underline{Y}_{45} & \underline{Y}_{46} & \underline{Y}_{47} & 0 & 0 \\ 0 & \underline{Y}_{52} & 0 & \underline{Y}_{54} & \underline{Y}_{55} & \underline{Y}_{56} & 0 & \underline{Y}_{58} & 0 \\ 0 & 0 & \underline{Y}_{63} & \underline{Y}_{64} & \underline{Y}_{65} & \underline{Y}_{66} & 0 & 0 & \underline{Y}_{69} \\ 0 & 0 & 0 & \underline{Y}_{74} & 0 & 0 & \underline{Y}_{77} & \underline{Y}_{78} & \underline{Y}_{79} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \underline{Y}_{85} & 0 & \underline{Y}_{87} & \underline{Y}_{88} & \underline{Y}_{89} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \underline{Y}_{96} & \underline{Y}_{97} & \underline{Y}_{98} & \underline{Y}_{99} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta U_1 \\ \Delta U_2 \\ \Delta U_3 \\ \Delta U_4 \\ \Delta U_5 \\ \Delta U_6 \\ \Delta U_7 \\ \Delta U_8 \\ \Delta U_9 \end{bmatrix} \quad (1.1)$$

Elementy macierzy admittancejnej \underline{Y} są obliczane na podstawie impedancji zastępczych linii WN, transformatora TR oraz linii L1 i L2, według zasady: admittancej własna węzła jest sumą admittancej gałęzi przyłączonych do danego węzła, a admittancej wzajemna to admittancej gałęzi pomiędzy danym węzłami wzięta ze znakiem minus. Ostatecznie dla sieci z (Rys. 1.2) elementy macierzy admittancejnej węzłowej są:

- admittancej własne:

$$\begin{aligned} \underline{Y}_{11} &= \frac{1}{\underline{Z}_{wnA} + \underline{Z}_{TRA}} + \frac{1}{\underline{Z}_{L1A}}, & \underline{Y}_{22} &= \frac{1}{\underline{Z}_{wnB} + \underline{Z}_{TRB}} + \frac{1}{\underline{Z}_{L1B}}, & \underline{Y}_{33} &= \frac{1}{\underline{Z}_{wnC} + \underline{Z}_{TRC}} + \frac{1}{\underline{Z}_{L1C}} \\ \underline{Y}_{44} &= \frac{1}{\underline{Z}_{L1A}} + \frac{1}{\underline{Z}_{L2A}}, & \underline{Y}_{55} &= \frac{1}{\underline{Z}_{L1B}} + \frac{1}{\underline{Z}_{L2B}}, & \underline{Y}_{66} &= \frac{1}{\underline{Z}_{L1C}} + \frac{1}{\underline{Z}_{L2C}} \\ \underline{Y}_{77} &= \frac{1}{\underline{Z}_{L2A}}, & \underline{Y}_{88} &= \frac{1}{\underline{Z}_{L2B}}, & \underline{Y}_{99} &= \frac{1}{\underline{Z}_{L2C}} \end{aligned} \quad (1.2)$$

- admittancej wzajemne:

$$\begin{aligned} \underline{Y}_{14} = \underline{Y}_{41} &= -\frac{1}{\underline{Z}_{L1A}}, & \underline{Y}_{25} = \underline{Y}_{52} &= -\frac{1}{\underline{Z}_{L1B}}, & \underline{Y}_{36} = \underline{Y}_{63} &= -\frac{1}{\underline{Z}_{L1C}}, \\ \underline{Y}_{47} = \underline{Y}_{74} &= -\frac{1}{\underline{Z}_{L2A}}, & \underline{Y}_{58} = \underline{Y}_{85} &= -\frac{1}{\underline{Z}_{L2B}}, & \underline{Y}_{69} = \underline{Y}_{96} &= -\frac{1}{\underline{Z}_{L2C}}, \end{aligned}$$

Przy czym impedancje faz linii $\underline{Z}_{wn,A,B,C}$, oznaczają impedancje $\underline{Z}_{WN,A,B,C}$ (odniesione do napięcia 110 kV), „sprowadzone do poziomu napięcia SN, a impedancje transformatora $\underline{Z}_{TR,A,B,C}$ są obliczone też na poziomie napięcia SN

1.3. Napięcia początkowe w sieci średniego napięcia

Zakładając pracę sieci bez obciążenia (stan jałowy) napięcia w tej sieci będą wynikały z napięć zasilających sieć od strony sieci wysokiego napięcia – sieci 110 kV. Należy przeliczyć napięcia zasilające sieć 110 kV \underline{E}_A , \underline{E}_B , \underline{E}_C na poziom średniego i niskiego napięcia przez przekładnię zwojową ϑ_{TR} i godzinową h_{TR} transformatora TR i dalej przez przekładnie transformatorów odbiorczych T1 i T2.

Zakłada się że napięcia zasilające są symetryczne, a napięcie \underline{E}_A fazy A jest w osi liczb urojonych:

$$[E] = \begin{bmatrix} \underline{E}_A \\ \underline{E}_B \\ \underline{E}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} |\underline{E}_A| \cdot e^{j90^\circ} \\ |\underline{E}_B| \cdot e^{j330^\circ} \\ |\underline{E}_C| \cdot e^{j120^\circ} \end{bmatrix} = [\underline{U}_{TRG}] \quad (1.3)$$

zatem występuje tylko składowa zgodna, która przenosi się przez transformator zgodnie ze wzorem, ale generalnie należy przekształcić napięcia w układzie fazowym na napięcia w składowych symetrycznych. Następnie przetransformować składowe symetryczne przez przekładnię zwojową i godzinową na stronę dolną. Na końcu należy przetransformowane składowe symetryczne przekształcić w składowe fazowe. Zatem przekształcamy napięcia zasilające na składowe symetryczne:

$$\begin{bmatrix} \underline{E}_0 \\ \underline{E}_1 \\ \underline{E}_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{E}_A \\ \underline{E}_B \\ \underline{E}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{U}_{0TRG} = 0 \\ \underline{U}_{1TRG} \\ \underline{U}_{2TRG} \end{bmatrix} \quad (1.4)$$

gdzie: $\underline{a} = \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right)$ $\underline{a}^2 = \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right)$.

Transformacja przez przekładnię zwojową i godzinową i dalej zamiana na składowe fazowe jest:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_{0TRD} \\ \underline{U}_{1TRD} \\ \underline{U}_{2TRD} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{U}_{1TRG} \\ \underline{U}_{2TRG} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ \vartheta_{TR} \cdot e^{-jh_{TR} \cdot 30^\circ} \\ \vartheta_{TR} \cdot e^{+jh_{TR} \cdot 30^\circ} \end{bmatrix} \quad \text{składowe fazowe} \quad \begin{bmatrix} \underline{U}_{TRDA} \\ \underline{U}_{TRDB} \\ \underline{U}_{TRDC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{U}_{0TRD} \\ \underline{U}_{1TRD} \\ \underline{U}_{2TRD} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{U}_{T1GA} \\ \underline{U}_{T1GB} \\ \underline{U}_{T1GC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{U}_{T2GA} \\ \underline{U}_{T2GB} \\ \underline{U}_{T2GC} \end{bmatrix} \quad (1.5)$$

Należy teraz te napięcia ‘przenieść’ dalej na strony dolne transformatorów odbiorczych T1 oraz T2. Metoda jest taka sama: napięcia w składowych fazowych $[\underline{U}_{T1G}]$, $[\underline{U}_{T2G}]$ zamienia się na składowe symetryczne i przenosi się je przez przekładnie zwojową i godzinową transformatorów i na końcu przelicza się je na składowe fazowe otrzymując napięcia na stronach dolnych transformatorów T1, T2. Można teraz z zadanych mocy odbiorów obliczyć prądy odbiorów.

Napięcia międzyfazowe z napięć fazowych oblicza się oblicza się w następujący sposób:

$$\begin{aligned} \underline{U}_{BA} &= \underline{U}_A - \underline{U}_B \\ \underline{U}_{AC} &= \underline{U}_C - \underline{U}_B \\ \underline{U}_{CB} &= \underline{U}_B - \underline{U}_C \end{aligned} \quad (1.6)$$

1.4. Obliczanie prądów odbiorów

Danymi do obliczeń są moce P,Q pobierane przez odbiory przyłączone do transformatorów SN/nN – do transformatora T1: $P_{T1A}, Q_{T1A}, P_{T1B}, Q_{T1B}, P_{T1C}, Q_{T1C}$, oraz do transformatora T2: $P_{T2A}, Q_{T2A}, P_{T2B}, Q_{T2B}, P_{T2C}, Q_{T2C}$. Dla zadanych napięć $[U_{T1}]$ i $[U_{T2}]$ można obliczyć prądy z ilorazu mocy sprzężonej przez napięcie sprzężone przykładowo w fazie A transformatora T1:

$$I_{T1DA} = \frac{S_{T1A}^*}{U_{T1DA}^*} = I_{a_{T1DA}} + I_{b_{T1DA}} = \frac{P_{T1A} - jQ_{T1A}}{U_{e_{T1DA}} - jU_{f_{T1DA}}} \quad (1.7)$$

gdzie:

$U_{e_{T1DA}}, U_{f_{T1DA}}$ – część czynna i urojona napięcia fazy A na stronie dolnej T1,

$I_{a_{T1DA}}, I_{b_{T1DA}}$ – część czynna i bierna prądu fazy A na stronie dolnej (nN) T1,

Podobnie dla pozostałych faz transformatora T1 i T2 otrzymujemy wektory prądów pobieranych przez odbiory:

$$[I_{T1D}] = \begin{bmatrix} I_{T1DA} \\ I_{T1DB} \\ I_{T1DC} \end{bmatrix} \quad [I_{T2D}] = \begin{bmatrix} I_{T2DA} \\ I_{T2DB} \\ I_{T2DC} \end{bmatrix} \quad (1.8)$$

Prądy te należy przetransformować na stronę górną transformatorów T1 i T2. Obliczenia dotyczą stanów asymetrycznego obciążenia, tak więc należy składowe fazowe zamienić na składowe symetryczne:

$$\begin{bmatrix} I_{0_{T1D}} \\ I_{1_{T1D}} \\ I_{2_{T1D}} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{T1DA} \\ I_{T1DB} \\ I_{T1DC} \end{bmatrix} \quad (1.9)$$

gdzie: $\underline{a} = \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right)$ $\underline{a}^2 = \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right)$.

Ponieważ transformatory SN/nN mają układ połączeń DY, przy czym punkt gwiazdowy strony niskiego napięcia jest uziemiony to składowa zerowa nie przenosi się na stronę średniego napięcia, a transformacja składowych zgodnych i przeciwnych prądów na stronę górnego napięcia jest:

$$\underline{I}_{1_{T1G}} = \frac{I_{1_{T1D}}}{\vartheta_{GDT1}} \cdot e^{-jh_{T1} \cdot 30^\circ} \quad \underline{I}_{2_{T1G}} = \frac{I_{2_{T1D}}}{\vartheta_{GDT1}} \cdot e^{+jh_{T1} \cdot 30^\circ} \quad (1.10)$$

Podobnie dla transformatora T2.

Należy teraz przekształcić składowe symetryczne prądów strony górnej transformatora w składowe fazowe, otrzymując ‘zastrzyki’ prądowe występujące w relacji (1.1) metody potencjałów węzłowych:

$$\begin{bmatrix} I_4 = I_{T1GA} \\ I_5 = I_{T1GB} \\ I_6 = I_{T1GC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ I_{1_{T1G}} \\ I_{2_{T1G}} \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} I_7 = I_{T2GA} \\ I_8 = I_{T2GB} \\ I_9 = I_{T2GC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ I_{1_{T2G}} \\ I_{2_{T2G}} \end{bmatrix} \quad (1.11)$$

Prądy te w pierwszym kroku są obliczane dla napięć początkowych obliczonych na podstawie wzorów (1.6).

1.5. Obliczanie napięć węzłowych

Mając obliczone wstępnie prądy węzłowe należy rozwiązać równanie macierzowe (1.1) – obliczyć inwersję macierzy \underline{Y} i można wtedy obliczyć wektor strat napięć $[\Delta \underline{U}]$:

$$\begin{bmatrix} \Delta \underline{U}_1 \\ \Delta \underline{U}_2 \\ \Delta \underline{U}_3 \\ \Delta \underline{U}_4 \\ \Delta \underline{U}_5 \\ \Delta \underline{U}_6 \\ \Delta \underline{U}_7 \\ \Delta \underline{U}_8 \\ \Delta \underline{U}_9 \end{bmatrix} = \underline{Z} = \underline{Y}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \underline{I}_1 = 0 \\ \underline{I}_2 = 0 \\ \underline{I}_3 = 0 \\ \underline{I}_4 = \underline{I}_{T1GA} \\ \underline{I}_5 = \underline{I}_{T1GB} \\ \underline{I}_6 = \underline{I}_{T1GC} \\ \underline{I}_7 = \underline{I}_{T2GA} \\ \underline{I}_8 = \underline{I}_{T2GB} \\ \underline{I}_9 = \underline{I}_{T2GC} \end{bmatrix} \quad (1.12)$$

Obliczone wartości strat napięć to różnice napięć pomiędzy napięciami zasilania w sieci rzeczywistej $\underline{E}'_A, \underline{E}'_B, \underline{E}'_C$ a napięciami węzłowymi węzłów 1 ÷ 9, stąd napięcia węzłowe są:

$$\begin{aligned} \underline{U}_{TRDA} &= \underline{U}_1 = \underline{E}'_A - \Delta \underline{U}_1 \\ \underline{U}_{TRDB} &= \underline{U}_2 = \underline{E}'_B - \Delta \underline{U}_2 \\ \underline{U}_{TRDC} &= \underline{U}_3 = \underline{E}'_A - \Delta \underline{U}_3 \\ \underline{U}_{T1GA} &= \underline{U}_4 = \underline{E}'_A - \Delta \underline{U}_4 \\ \underline{U}_{T1GB} &= \underline{U}_5 = \underline{E}'_B - \Delta \underline{U}_5 \\ \underline{U}_{T1GC} &= \underline{U}_6 = \underline{E}'_C - \Delta \underline{U}_6 \\ \underline{U}_{T2GA} &= \underline{U}_7 = \underline{E}'_A - \Delta \underline{U}_7 \\ \underline{U}_{T2GB} &= \underline{U}_8 = \underline{E}'_B - \Delta \underline{U}_8 \\ \underline{U}_{T1GC} &= \underline{U}_9 = \underline{E}'_C - \Delta \underline{U}_9 \end{aligned} \quad (1.13)$$

Obliczone napięcia odnoszą się do napięć rzeczywistych w sieci sprowadzonej do napięcia średniego, zatem obliczone napięcia $\underline{U}_4, \underline{U}_5, \underline{U}_6$, są nowymi napięciami na stronie górnej transformatora odbiorczego T1, a napięcia $\underline{U}_7, \underline{U}_8, \underline{U}_9$, są nowymi napięciami na stronie górnej transformatora odbiorczego T2.

Do skorygowania prądów odbiorów należy te napięcia przeliczyć na stronę dolną transformatorów T1, T2 przez przekładnie zwojowe i godzinowe tych transformatorów. Należy więc je wyrazić w składowych symetrycznych, przetransformować te składowe symetryczne na dolne strony transformatorów T1, T2 i przeliczyć na składowe fazowe:

- składowe symetryczne napięć górnych – transformatora T1 T2

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_{0T1G} \\ \underline{U}_{1T1G} \\ \underline{U}_{2T1G} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{U}_{T1GA} \\ \underline{U}_{T1Gb} \\ \underline{U}_{T1GC} \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} \underline{U}_{0T2G} \\ \underline{U}_{1T2G} \\ \underline{U}_{2T2G} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{U}_{T2GA} \\ \underline{U}_{T2GB} \\ \underline{U}_{T2GC} \end{bmatrix} \quad (1.14)$$

- składowe symetryczne przetransformowane na stronę dolną transformatorów T1 T2

$$\begin{aligned} \underline{U}_{1T1D} &= \underline{U}_{1T1G} \cdot \vartheta_{GD1}^{-1} \cdot e^{-jh_{T1} \cdot 30} & \underline{U}_{1T2D} &= \underline{U}_{1T2G} \cdot \vartheta_{GD2}^{-1} \cdot e^{-jh_{T2} \cdot 30} \\ \underline{U}_{2T1D} &= \underline{U}_{2T1G} \cdot \vartheta_{GD1}^{-1} \cdot e^{+jh_{T1} \cdot 30} & \underline{U}_{2T2D} &= \underline{U}_{2T2G} \cdot \vartheta_{GD2}^{-1} \cdot e^{+jh_{T2} \cdot 30} \end{aligned} \quad (1.15)$$

- składowe fazowe napięć po stronie dolnej transformatorów T1, T2

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_{T1DA} \\ \underline{U}_{T1DB} \\ \underline{U}_{T1DC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ \underline{U}_{1T1D} \\ \underline{U}_{2T1D} \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} \underline{U}_{T2DA} \\ \underline{U}_{T2DB} \\ \underline{U}_{T2DC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ \underline{U}_{1T2D} \\ \underline{U}_{2T2D} \end{bmatrix} \quad (1.16)$$

Mając obliczone nowe napięcia fazowe po stronie dolnej transformatorów należy skorygować prądy odbiorów na podstawie wzorów (1.7) do (1.11) i ponownie powtarzać obliczenia aż do osiągnięcia niewielkich zmian napięć węzłowych.

1.6. Obliczanie napięć wynikowych w układzie przesyłowym

Z obliczeń iteracyjnych otrzymano napięcia na stronach górnych transformatorów T2, T1 oraz na dolnym poziomie transformatora TR:

$$[\underline{U}_{TRD}] = \begin{bmatrix} \underline{U}_{TRDA} \\ \underline{U}_{TRDB} \\ \underline{U}_{TRDC} \end{bmatrix} \quad [\underline{U}_{T1G}] = \begin{bmatrix} \underline{U}_{T1GA} \\ \underline{U}_{T1GB} \\ \underline{U}_{T1GC} \end{bmatrix} \quad [\underline{U}_{T2G}] = \begin{bmatrix} \underline{U}_{T2GA} \\ \underline{U}_{T2GB} \\ \underline{U}_{T2GC} \end{bmatrix}$$

Brakuje jeszcze napięć na zaciskach górnych transformatora TR odniesionych do napięcia średniego, oraz napięć po stronie 110 kV. Należy więc najpierw obliczyć napięcia za impedancjami transformatora, a następnie te napięcia przetransformować na stronę górną transformatora TR, przez przekładnię zwojową i godzinową. Przez transformator TR po stronie SN płynie suma prądów odbiorów czyli w tym przypadku:

$$\begin{aligned} \underline{I}_{TRDA} &= \underline{I}_{T1GA} + \underline{I}_{T2GA} \\ \underline{I}_{TRDB} &= \underline{I}_{T1GB} + \underline{I}_{T2GB} \\ \underline{I}_{TRDC} &= \underline{I}_{T1GC} + \underline{I}_{T2GC} \end{aligned} \quad (1.17)$$

Napięcia za impedancjami transformatora na poziomie napięcia średniego są powiększone o straty napięć na impedancjach transformatora:

$$\begin{aligned} \underline{U}'_{TRGA} &= \underline{U}_{TRDA} + \underline{Z}_{TRA} \cdot \underline{I}_{TRDA} \\ \underline{U}'_{TRGB} &= \underline{U}_{TRDB} + \underline{Z}_{TRB} \cdot \underline{I}_{TRDB} \\ \underline{U}'_{TRGC} &= \underline{U}_{TRDC} + \underline{Z}_{TRC} \cdot \underline{I}_{TRDC} \end{aligned} \quad (1.18)$$

Transformacja napięć polega na przekształceniu napięć fazowych w składowe symetryczne:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}'_{0'TRG} \\ \underline{U}'_{1'TRG} \\ \underline{U}'_{2'TRG} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{U}'_{TRGA} \\ \underline{U}'_{TRGB} \\ \underline{U}'_{TRGC} \end{bmatrix} \quad (1.19)$$

i przetransformowaniu składowej zgodnej i przeciwnej napięć przez przekładnię zwojową i godzinową transformatora TR:

$$\underline{U}_{1TRG} = \underline{U}'_{1TRD} \cdot \vartheta_{GDTR} \cdot e^{+jh_{TR} \cdot 30} \quad \underline{U}_{2TRG} = \underline{U}'_{2TRD} \cdot \vartheta_{GDTR} \cdot e^{-jh_{TR} \cdot 30} \quad (1.20)$$

a następnie przekształcenie składowych symetrycznych na składowe fazowe napięć:

$$[\underline{U}_{TRG}] = \begin{bmatrix} \underline{U}_{TRGA} \\ \underline{U}_{TRGB} \\ \underline{U}_{TRGC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ \underline{U}_{1TRG} \\ \underline{U}_{2TRG} \end{bmatrix} \quad (1.21)$$

Obliczone napięcia górne stanowią napięcia końcowe na linii WN 110 kV, a prądy strony górnej transformatora są takie same jak w linii WN.

1.7. Obliczanie rozpyły mocy w sieci średniego napięcia

Zostały obliczone wszystkie napięcia i prądy płynące w elementach sieci można więc obliczyć moce czynne i bierne płynące w liniach L1, L2, transformatorze TR oraz w linii WN 110 kV.

1.7.1. Przepływ mocy w linii L2

Napięcie początkowe linii **L2**

$$[\underline{U}_{pL2}] = \begin{bmatrix} \underline{U}_{T1GA} \\ \underline{U}_{T1GB} \\ \underline{U}_{T1GC} \end{bmatrix}$$

Napięcie końcowe linii **L2**

$$[\underline{U}_{kL2}] = \begin{bmatrix} \underline{U}_{T2GA} \\ \underline{U}_{T2GB} \\ \underline{U}_{T2GC} \end{bmatrix}$$

Prąd płynący w linii **L2**

$$\begin{aligned} \underline{I}_{L2A} &= \frac{\underline{U}_{T1GA} - \underline{U}_{T2GA}}{\underline{Z}_{L2A}} \\ \underline{I}_{L2B} &= \frac{\underline{U}_{T1GB} - \underline{U}_{T2GB}}{\underline{Z}_{L2B}} \\ \underline{I}_{L2C} &= \frac{\underline{U}_{T1GC} - \underline{U}_{T2GC}}{\underline{Z}_{L2C}} \end{aligned}$$

Moc na początku **L2**

$$\begin{aligned} \underline{S}_{pL2A} &= P_{pL2A} + jQ_{pL2A} = \underline{U}_{T1GA} \cdot \underline{I}_{L2A}^* \\ \underline{S}_{pL2B} &= P_{pL2B} + jQ_{pL2B} = \underline{U}_{T1GB} \cdot \underline{I}_{L2B}^* \\ \underline{S}_{pL2C} &= P_{pL2C} + jQ_{pL2C} = \underline{U}_{T1GC} \cdot \underline{I}_{L2C}^* \end{aligned}$$

Moc na końcu z linii **L2**

$$\begin{aligned} \underline{S}_{kL2A} &= P_{kL2A} + jQ_{kL2A} = \underline{U}_{T2GA} \cdot \underline{I}_{L2A}^* \\ \underline{S}_{kL2B} &= P_{kL2B} + jQ_{kL2B} = \underline{U}_{T2GB} \cdot \underline{I}_{L2B}^* \\ \underline{S}_{kL2C} &= P_{kL2C} + jQ_{kL2C} = \underline{U}_{T2GC} \cdot \underline{I}_{L2C}^* \end{aligned}$$

(1.22)

Straty mocy czynnej w linii **L2**

$$\begin{aligned} \Delta P_{L2A} &= R_{L2A} \cdot |\underline{I}_{L2A}|^2 \\ \Delta P_{L2B} &= R_{L2B} \cdot |\underline{I}_{L2B}|^2 \\ \Delta P_{L2C} &= R_{L2C} \cdot |\underline{I}_{L2C}|^2 \end{aligned}$$

Straty mocy biernej w linii **L2**

$$\begin{aligned} \Delta Q_{L2A} &= X_{L2A} \cdot |\underline{I}_{L2A}|^2 \\ \Delta Q_{L2B} &= X_{L2B} \cdot |\underline{I}_{L2B}|^2 \\ \Delta Q_{L2C} &= X_{L2C} \cdot |\underline{I}_{L2C}|^2 \end{aligned}$$

Suma strat mocy czynnej w linii **L2**

$$\Delta P_{L2} = \Delta P_{L2A} + \Delta P_{L2B} + \Delta P_{L2C}$$

Suma strat mocy biernej w linii **L2**

$$\Delta Q_{L2} = \Delta Q_{L2A} + \Delta Q_{L2B} + \Delta Q_{L2C}$$

1.7.2. Przepływ mocy w linii $L1$

Napięcie początkowe linii $L1$

$$[\underline{U}_{pL1}] = \begin{bmatrix} \underline{U}_{TRDA} \\ \underline{U}_{TRDB} \\ \underline{U}_{TRDC} \end{bmatrix}$$

Napięcie końcowe linii $L1$

$$[\underline{U}_{kL1}] = \begin{bmatrix} \underline{U}_{T1GA} \\ \underline{U}_{T1GB} \\ \underline{U}_{T1GC} \end{bmatrix}$$

Prąd płynący w linii $L1$

$$\underline{I}_{L1A} = \frac{\underline{U}_{TRDA} - \underline{U}_{T1GA}}{\underline{Z}_{L1A}}$$

$$\underline{I}_{L1B} = \frac{\underline{U}_{TRDB} - \underline{U}_{T1GB}}{\underline{Z}_{L2B}}$$

$$\underline{I}_{L1C} = \frac{\underline{U}_{TRDC} - \underline{U}_{T1GC}}{\underline{Z}_{L2C}}$$

Moc na początku $L1$

$$\underline{S}_{pL1A} = P_{pL1A} + jQ_{pL1A} = \underline{U}_{TRDA} \cdot \underline{I}_{L1A}^*$$

$$\underline{S}_{pL1B} = P_{pL1B} + jQ_{pL1B} = \underline{U}_{TRDB} \cdot \underline{I}_{L1B}^*$$

$$\underline{S}_{pL1C} = P_{pL1C} + jQ_{pL1C} = \underline{U}_{TRDC} \cdot \underline{I}_{L1C}^*$$

Moc na końcu z linii $L1$

$$\underline{S}_{kL1A} = P_{kL1A} + jQ_{kL1A} = \underline{U}_{T1GA} \cdot \underline{I}_{L1A}^*$$

$$\underline{S}_{kL1B} = P_{kL1B} + jQ_{kL1B} = \underline{U}_{T1GB} \cdot \underline{I}_{L1B}^*$$

$$\underline{S}_{kL1C} = P_{kL1C} + jQ_{kL1C} = \underline{U}_{T1GC} \cdot \underline{I}_{L1C}^*$$

Straty mocy czynnej w linii $L1$

$$\Delta P_{L1A} = R_{L1A} \cdot |\underline{I}_{L1A}|^2$$

$$\Delta P_{L1B} = R_{L1B} \cdot |\underline{I}_{L1B}|^2$$

$$\Delta P_{L1C} = R_{L1C} \cdot |\underline{I}_{L1C}|^2$$

Straty mocy biernej w linii $L1$

$$\Delta Q_{L1A} = X_{L1A} \cdot |\underline{I}_{L1A}|^2$$

$$\Delta Q_{L1B} = X_{L1B} \cdot |\underline{I}_{L1B}|^2$$

$$\Delta Q_{L1C} = X_{L1C} \cdot |\underline{I}_{L1C}|^2$$

Suma strat mocy czynnej w linii $L2$

$$\Delta P_{L1} = \Delta P_{L1A} + \Delta P_{L1B} + \Delta P_{L1C}$$

Suma strat mocy biernej w linii $L2$

$$\Delta Q_{L1} = \Delta Q_{L1A} + \Delta Q_{L1B} + \Delta Q_{L1C}$$

(1.23)

1.7.3. Przepływ mocy w transformatorze TR

Napięcie początkowe transformatora TR

$$[\underline{U}_{pTR}] = \begin{bmatrix} \underline{U}'_{TRGA} \\ \underline{U}'_{TRGB} \\ \underline{U}'_{TRGC} \end{bmatrix}$$

Napięcie końcowe transformatora TR

$$[\underline{U}_{kTR}] = \begin{bmatrix} \underline{U}_{TRDA} \\ \underline{U}_{TRDB} \\ \underline{U}_{TRDC} \end{bmatrix}$$

Prąd płynący w transformatorze TR (po stronie SN)

$$\underline{I}_{TRA} = \frac{\underline{U}'_{TRGA} - \underline{U}_{TRDA}}{\underline{Z}_{TRA}}$$

$$\underline{I}_{TRB} = \frac{\underline{U}'_{TRGB} - \underline{U}_{TRDB}}{\underline{Z}_{TRB}}$$

$$\underline{I}_{TRC} = \frac{\underline{U}'_{TRGC} - \underline{U}_{TRDC}}{\underline{Z}_{TRC}}$$

Moc wpływająca do transformatora TR

$$\underline{S}_{pTRA} = P_{pTRA} + jQ_{pTRA} = \underline{U}'_{TRGA} \cdot \underline{I}_{TRA}^*$$

$$\underline{S}_{pTRB} = P_{pTRB} + jQ_{pTRB} = \underline{U}'_{TRGB} \cdot \underline{I}_{TRB}^*$$

$$\underline{S}_{pTRC} = P_{pTRC} + jQ_{pTRC} = \underline{U}'_{TRGC} \cdot \underline{I}_{TRC}^*$$

Moc wpływająca z transformatora TR

$$\underline{S}_{kTRA} = P_{kTRA} + jQ_{kTRA} = \underline{U}_{TRDA} \cdot \underline{I}_{TRA}^*$$

$$\underline{S}_{kTRB} = P_{kTRB} + jQ_{kTRB} = \underline{U}_{TRDB} \cdot \underline{I}_{TRB}^*$$

$$\underline{S}_{kTRC} = P_{kTRC} + jQ_{kTRC} = \underline{U}_{TRDC} \cdot \underline{I}_{TRC}^*$$

(1.24)

Straty mocy czynnej w transformatorze TR

$$\Delta P_{TRA} = R_{TRA} \cdot |\underline{I}_{TRA}|^2$$

$$\Delta P_{TRB} = R_{TRB} \cdot |\underline{I}_{TRB}|^2$$

$$\Delta P_{TRC} = R_{TRC} \cdot |\underline{I}_{TRC}|^2$$

Straty mocy biernej w linii LI

$$\Delta Q_{TRA} = X_{TRA} \cdot |\underline{I}_{TRA}|^2$$

$$\Delta Q_{TRB} = X_{TRB} \cdot |\underline{I}_{TRB}|^2$$

$$\Delta Q_{TRC} = X_{TRC} \cdot |\underline{I}_{TRC}|^2$$

Suma strat mocy czynnej w transformatorze TR

$$\Delta P_{TR} = \Delta P_{TRA} + \Delta P_{TRB} + \Delta P_{TRC}$$

Suma strat mocy biernej w transformatorze TR

$$\Delta Q_{TR} = \Delta Q_{TRA} + \Delta Q_{TRB} + \Delta Q_{TRC}$$

1.7.4. Przepływy mocy w linii WN 110 kV

Napięcie początkowe linii WN

$$[\underline{U}_{pWN}] = \begin{bmatrix} \underline{E}_A \\ \underline{E}_B \\ \underline{E}_C \end{bmatrix}$$

Napięcie końcowe linii WN

$$[\underline{U}_{kWN}] = \begin{bmatrix} \underline{U}_{TRGA} \\ \underline{U}_{TRGB} \\ \underline{U}_{TRGC} \end{bmatrix}$$

Prąd płynący w linii WN

$$\underline{I}_{WNA} = \frac{\underline{E}_A - \underline{U}_{TRGA}}{\underline{Z}_{WNA}}$$

$$\underline{I}_{WNB} = \frac{\underline{E}_B - \underline{U}_{TRGB}}{\underline{Z}_{WNB}}$$

$$\underline{I}_{WNC} = \frac{\underline{E}_C - \underline{U}_{TRGC}}{\underline{Z}_{WNC}}$$

Moc na początku WN

$$\underline{S}_{pWNA} = P_{pWNA} + jQ_{pWNA} = \underline{E}_A \cdot \underline{I}_{WNA}^*$$

$$\underline{S}_{pWNB} = P_{pWNB} + jQ_{pWNB} = \underline{E}_B \cdot \underline{I}_{WNB}^*$$

$$\underline{S}_{pWNC} = P_{pWNC} + jQ_{pWNC} = \underline{E}_C \cdot \underline{I}_{WNC}^*$$

Moc na końcu z linii WN

$$\underline{S}_{kWNA} = P_{kWNA} + jQ_{kWNA} = \underline{U}_{TRGA} \cdot \underline{I}_{WNA}^*$$

$$\underline{S}_{kWNB} = P_{kWNB} + jQ_{kWNB} = \underline{U}_{TRGB} \cdot \underline{I}_{WNB}^*$$

$$\underline{S}_{kWNC} = P_{kWNC} + jQ_{kWNC} = \underline{U}_{TRGC} \cdot \underline{I}_{WNC}^*$$

(1.25)

Straty mocy czynnej w linii WN

$$\Delta P_{WNA} = R_{WNA} \cdot |\underline{I}_{WNA}|^2$$

$$\Delta P_{WNB} = R_{WNB} \cdot |\underline{I}_{WNB}|^2$$

$$\Delta P_{WNC} = R_{WNC} \cdot |\underline{I}_{WNC}|^2$$

Straty mocy biernej w linii WN

$$\Delta Q_{WNA} = X_{WNA} \cdot |\underline{I}_{WNA}|^2$$

$$\Delta Q_{WNB} = X_{WNB} \cdot |\underline{I}_{WNB}|^2$$

$$\Delta Q_{WNC} = X_{WNC} \cdot |\underline{I}_{WNC}|^2$$

Suma strat mocy czynnej w linii WN

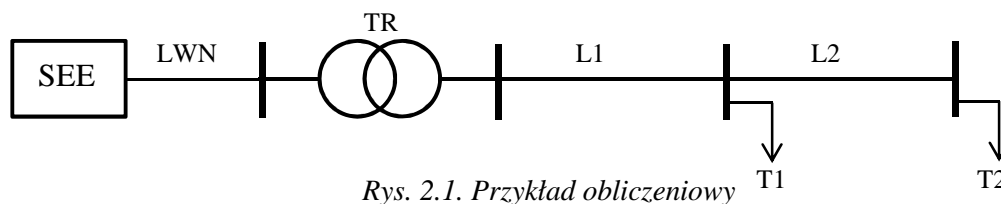
$$\Delta P_{WN} = \Delta P_{WNA} + \Delta P_{WNB} + \Delta P_{WNC}$$

Suma strat mocy biernej w linii WN

$$\Delta Q_{WN} = \Delta Q_{WNA} + \Delta Q_{WNB} + \Delta Q_{WNC}$$

2. Przykład obliczeń sieci średniego napięcia pakietem Plans

Jako przykład obliczeniowy wzięto pod uwagę prosty układ przesyłowy jak na (Rys. 2.1) składający się z dwóch odcinków linii średniego napięcia zasilanych z transformatora 110/SN przez linię 110kV podłączonej do systemu przesyłowego SEE.



Rys. 2.1. Przykład obliczeniowy

Parametry elementów tego układu są:

Linia 110 kV: $R'=0,24 \Omega/\text{km}$, $X'=0,4 \Omega/\text{km}$, $l=10 \text{ km}$, stąd $\underline{Z}_N=(2,40+j4,20) \Omega$.

Transformator TR (110/SN):

$S_n=25 \text{ MVA}$, $\Delta U_z=12 \%$, $\Delta P_{Cu}=140 \text{ kW}$, $U_{ng}/U_{nd}=115/16,5 \text{ kV}$, układ połączeń: **YD11**.

$$R_{TRG} = \frac{\Delta P_{Cu} \cdot U_{ng}^2}{1000 \cdot S_n^2} = \frac{140 \cdot 115^2}{1000 \cdot 25^2} = 2,962 \Omega, \quad |Z_{TRG}| = \frac{\Delta u_z \cdot U_{ng}^2}{100 \cdot S_n} = \frac{12 \cdot 115^2}{100 \cdot 25} = 63,480 \Omega,$$

$$X_{TRG} = \sqrt{|Z_{TRG}|^2 - R_{TRG}^2} = \sqrt{63,480^2 - 2,962^2} = 63,411 \Omega, \quad \vartheta T = \frac{U_{ng}}{U_{nd}} = \frac{115}{16,5} = 6,9697.$$

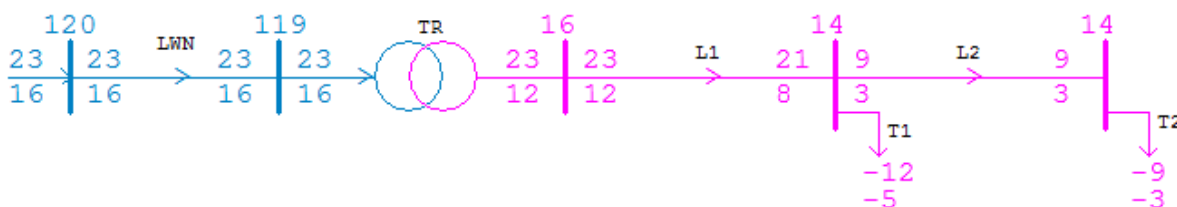
Parametry odcinków linii średniego napięcia: $R'=0,12 \Omega/\text{km}$, $X'=0,34 \Omega/\text{km}$,

Odcinek pierwszy: $l=5 \text{ km}$, stąd $\underline{Z}_{L1}=(0,60+j1,7) \Omega$. Odcinek drugi: $l=2 \text{ km}$, stąd $\underline{Z}_{L2}=(0,24+j0,68) \Omega$.

Obciążenia odbiorów (transform. T1,T2) przyjęto: $\underline{S}_{T1}=(12,0+j4,50) \text{ MVA}$, $\underline{S}_{T2}=(9,00+j3,00) \text{ MVA}$.

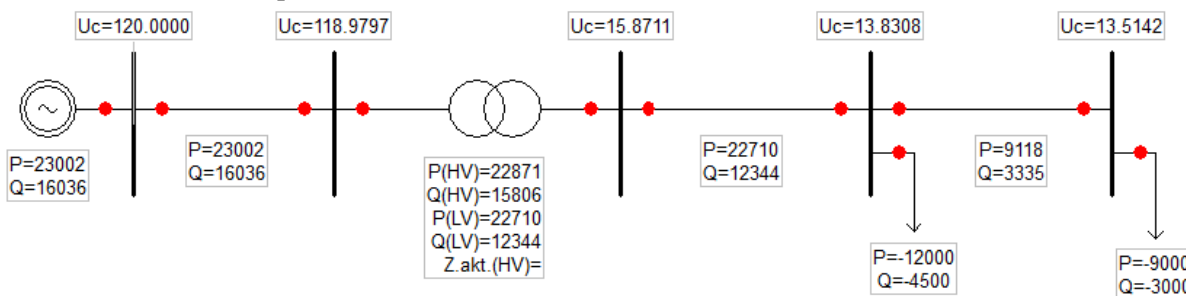
W obliczeniach nie uwzględniano impedancji transformatorów lecz przyjęto, że to są transformatory: T1 – 15/6kV DY11, T2 – 15/0,4kV DY5 z uziemionymi punktami zerowymi po stronie nN.

Wyniki obliczeń z programu rozplwowego **Plans** (służącego głównie do obliczania rozplwów w sieciach przesyłowych najwyższych napięć) przedstawia (Rys.2.2). Wyniki obliczeń z programu rozplwowego **Plans** (służącego głównie do obliczania rozplwów w w sieciach przesyłowych najwyższych napięć) przedstawia (Rys.2.2).



Rys.2.2. Wyniki obliczeń z programu **Plans** (dla sieci przesyłowej)

Obciążenia i przepływy mocy w tym programie są standardowo wyświetlane z dokładnością do 1MW, stąd trudno je porównywać z przepływami w sieci rozdzielczej, gdzie obciążenia tej sieci są rzędu kilkunastu kilowatów. Dokładne wyniki są wyświetlane w programie **PlansSN** (Rys.2.3) służącym do obliczeń sieci średnich napięć.



Rys.2.3. Wyniki obliczeń z programu **PlansSN**

3. Przykład obliczeń - stan symetrycznego obciążenia

W celu sprawdzenia poprawności opisanej metody obliczeniowej wykonano obliczenia sieci średniego napięcia przy obciążeniu symetrycznym i porównano wyniki tych obliczeń z wynikami obliczeń wykonanymi za pomocą programów z pakietu Plans.

3.1. Dane do obliczeń – impedancje elementów

Parametry elementów sieci wynikają z parametrów konstrukcyjnych i zostały obliczone wcześniej i zestawione w (Tab. 3.1).

Tab. 3.1. Parametry impedancyjne elementów

Element	Napięcie	Oznaczenie	R	X	g
-	kV	-	Ω	Ω	-
LWN	110	\underline{Z}_{WN}	2,400	4,200	
TR	115/16,5	\underline{Z}_{TRG}	2,962	63,411	6,9697
L1	15	\underline{Z}_{L1}	0,600	1,700	
L2	15	\underline{Z}_{L2}	0,240	0,680	

Dla omawianej metody obliczeń sieci średnich napięć należy impedancje linii wysokiego napięcia i transformatora przeliczyć na stronę dolną transformatora TR.

Linia WN:

$$Z_{wn} = \frac{Z_{WN}}{v_{TRGD}^2} = \frac{2,4 + j4,2}{6,9697^2} = (0,0494 + j0,0865)\Omega$$

Transformator TR:

$$\underline{Z}_{TR} = \frac{Z_{TRG}}{v_{TRGD}^2} = \frac{2,962 + j63,480}{6,9697^2} = (0,0610 + j1,307)\Omega$$

Transformator T1:

Ung/Und=115/6 kV, układ połączeń: **Yd11**

Transformator T2:

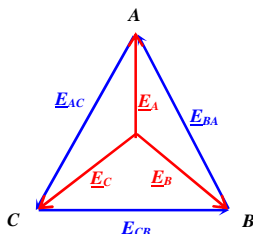
Ung/Und=115/0,4 kV, układ połączeń: **Yd5**

Tab. 3.2. Parametry impedancyjne sprowadzone do 15 kV

Oznaczenie	R	X
-	Ω	Ω
\underline{Z}_{wn}	0,0494	0,0865
\underline{Z}_{TR}	0,0610	1,3068
\underline{Z}_{L1}	0,6000	1,7000
\underline{Z}_{L2}	0,2400	0,6800

3.2. Dane do obliczeń – napięcia zasilające w kroku pierwszym

Przyjęto założenie, że napięcie zasilające sieć 110kV jest równe 120 kV ($|\underline{E}_p|=120\text{kV}$) i jest to napięcie międzyfazowe, stąd napięcie fazowe jest: $|\underline{E}_f|=120/\sqrt{3}=69,282\text{kV}$. Przyjęto, że gwiazda napięć fazowych jest jak (Rys. 3.1). Napięcie w fazie *A* jest w osi liczb urojonych, zatem kąt wektora \underline{E}_A jest 90° , a napięcie \underline{E}_B ma kąt 330° , zaś \underline{E}_C ma kąt 210° .



Rys. 3.1. Napięcia zasilające

Wartości liczbowe napięć fazowych zasilających linię 110 kV przedstawiono w (Tab. 3.3).

Tab. 3.3. Napięcia SEM 110kV fazowe

Napięcia fazowe		
	Układ biegunowy	Układ algebraiczny
\underline{E}_A	$69,282 \cdot e^{j90^\circ}$	$(0,000 + j69,282)\text{kV}$
\underline{E}_B	$69,282 \cdot e^{j330^\circ}$	$(60,000 - j34,641)\text{kV}$
\underline{E}_C	$69,282 \cdot e^{j210^\circ}$	$(-60,000 - j34,641)\text{kV}$

Napięcia fazowe \underline{E}_A , \underline{E}_B , \underline{E}_C zasilające sieć 110kV sprowadzić należy do poziomu napięcia dolnego transformatora (sieci SN) przez przekładnię zwojową transformatora TR: $\vartheta_{TR} = \frac{U_{nGTR}}{U_{nDTR}} = \frac{115}{16,5} = 6,9697$ i godzinową $h_{TR}=11$:

Napięcia SEM w składowych symetrycznych:

$$\begin{bmatrix} \underline{E}0 \\ \underline{E}1 \\ \underline{E}2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{E}_A \\ \underline{E}_B \\ \underline{E}_C \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0,000 + j69,282 \\ 60,000 - j34,641 \\ -60,000 - j34,641 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0,000 + j69,282 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ kV}$$

Transformacja składowych symetrycznych SEM na dolną stronę transformatora TR:

$$\begin{bmatrix} \underline{E}0' \\ \underline{E}1' \\ \underline{E}2' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{\underline{E}1}{\vartheta_{TR}} \cdot e^{-jh_{TR} \cdot 30^\circ} \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{0,000 + j69,282}{6,9697} \cdot e^{-j11 \cdot 30^\circ} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -4,970 + j8,609 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ kV} \begin{bmatrix} \underline{U}0_{T1G} \\ \underline{U}1_{T1G} \\ \underline{U}2_{T1G} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{U}0_{T2G} \\ \underline{U}1_{T2G} \\ \underline{U}2_{T2G} \end{bmatrix}$$

Napięcia w składowych fazowych TR odniesione do SN (i na stronie górnej T1,T2):

$$\begin{bmatrix} \underline{E}'_A \\ \underline{E}'_B \\ \underline{E}'_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{E}0' \\ \underline{E}1' \\ \underline{E}2' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ -4,970 + j8,609 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -4,970 + j8,609 \\ 9,940 - j0,000 \\ -4,970 - j8,609 \end{bmatrix} \text{ kV} = \begin{bmatrix} \underline{U}_{T1GA} \\ \underline{U}_{T1GB} \\ \underline{U}_{T1GC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{U}_{T2GA} \\ \underline{U}_{T2GB} \\ \underline{U}_{T2GC} \end{bmatrix}$$

Napięcia strony górnej transformatorów T1, T2 należy przetransformować na strony dolne tych transformatorów. Napięcia strony górnej T1 należy sprowadzić do poziomu napięcia dolnego 6 kV przez przekładnię zwojową $\vartheta_{T1} = \frac{U_{nGT1}}{U_{nDT1}} = \frac{15}{6} = 2,5$ i godzinową $h_{T1}=11$, natomiast napięcie strony górnej T2 przez przekładnię zwojową $\vartheta_{T2} = \frac{U_{nGT1}}{U_{nDT1}} = \frac{15}{0,4} = 37,5$ i godzinową $h_{T1}=11$.

Napięcia na T1 składowych symetrycznych odniesione do napięcia dolnego (6 kV):

$$\begin{bmatrix} \underline{U}0_{T1D} \\ \underline{U}1_{T1D} \\ \underline{U}2_{T1D} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{\underline{U}1_{T1G}}{\vartheta_{T1}} \cdot e^{-jh_{T1} \cdot 30^\circ} \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{-4,970 + j8,609}{2,5} \cdot e^{-j11 \cdot 30^\circ} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -3,443 + j1,988 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ kV}$$

Napięcia na T1 składowych fazowych odniesione do napięcia dolnego (6kV):

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_{T1DA}^{(1)} \\ \underline{U}_{T1DB}^{(1)} \\ \underline{U}_{T1DC}^{(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{U}_{T1D} \\ \underline{U}_{T1D} \\ \underline{U}_{T1D} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ -3,443 + j1,988 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -3,443 + j1,988 \\ 3,443 + j1,988 \\ 0,000 - j3,976 \end{bmatrix} kV$$

Napięcia na T2 składowych symetrycznych odniesione do napięcia dolnego (0,4 kV):

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_{T2D} \\ \underline{U}_{T2D} \\ \underline{U}_{T2D} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{\underline{U}_{T2G}}{\vartheta_{T2}} \cdot e^{-j\vartheta_{T2} \cdot 30^\circ} \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ -4,970 + j8,609 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot e^{-j5 \cdot 30^\circ} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0,230 - j0,133 \\ 0 \end{bmatrix} kV$$

Napięcia na T2 składowych fazowych odniesione do napięcia dolnego (0,4 kV):

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_{T2DA}^{(1)} \\ \underline{U}_{T2DB}^{(1)} \\ \underline{U}_{T2DC}^{(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{U}_{T2D} \\ \underline{U}_{T2D} \\ \underline{U}_{T2D} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0,230 - j0,133 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,230 - j0,133 \\ -0,230 + j0,133 \\ 0,000 + j0,265 \end{bmatrix} kV$$

3.3. Dane do obliczeń – odbiory w kroku pierwszym

Przyjęto obciążenia symetryczne transformatorów T1, T2 o całkowitych mocach:

$$\underline{S}_{T1} = (12,0 + j4,50) \text{ MVA} \quad \underline{S}_{T2} = (9,00 + j3,00) \text{ MVA}$$

a więc dla każdej fazy jest: $\underline{S}_{T1,A,B,C} = (4,00 + j1,50) \text{ MVA}$ $\underline{S}_{T2,A,B,C} = (3,00 + j1,00) \text{ MVA}$.

Do obliczeń potrzebne będą prądy wynikające z przyjętych mocy czynnych i biernych odbiorów podłączonych to transformatorów T1, T2 oraz napięć na zaciskach dolnych tych transformatorów, które to zależą od rozptywu prądu w sieci. W pierwszym kroku należy przyjąć napięcia nN obliczone wyżej. Prądy te obliczane są według wzoru (1.7):

- prądy odbiorów podłączonych do transformatora T1 na poziomie nN:

$$\underline{I}_{T1DA} = \frac{S_{T1A}^*}{U_{T1DA}^*} = \frac{4,00 - j1,50}{-3,443 - j1,988} = (-0,683 + j0,830) kA$$

$$\underline{I}_{T1DB} = \frac{S_{T1B}^*}{U_{T1DB}^*} = \frac{4,00 - j1,50}{3,443 - j1,988} = (1,060 + j0,176) kA$$

$$\underline{I}_{T1DC} = \frac{S_{T1C}^*}{U_{T1DC}^*} = \frac{4,00 - j1,50}{0,000 + j3,976} = (-0,377 - j1,006) kA$$

- prądy odbiorów podłączonych do transformatora T2 na poziomie nN:

$$\underline{I}_{T2DA} = \frac{S_{T2A}^*}{U_{T2DA}^*} = \frac{3,00 - j1,00}{0,230 + j0,133} = (7,915 - j8,926) kA$$

$$\underline{I}_{T2DB} = \frac{S_{T2B}^*}{U_{T2DB}^*} = \frac{3,00 - j1,00}{-0,230 + j0,133} = (-11,687 + j2,392) kA$$

$$\underline{I}_{T2DC} = \frac{S_{T2C}^*}{U_{T2DC}^*} = \frac{3,00 - j1,00}{0,000 - j0,265} = (3,772 + j11,317) kA$$

Następnym krokiem jest transformacja tych prądów na stronę górną (SN) transformatorów T1, T2. Obliczenia docelowo dotyczą stanów niesymetrycznego obciążenia, tak więc taka transformacja polega na przekształceniu prądów fazowych na składowe symetryczne według wzoru (1.9). Następnie należy pominąć składową zerową, gdyż ona ‘zamyka’ się przez uziemienia punktów gwiazdowych uzwojeń dolnych. Należy teraz przenieść składową zgodną i przeciwną na górną stronę transformatorów T1, T2 według wzoru (1.10) i na końcu przekształcić te składowe symetryczne na składowe fazowe – wzory (1.11).

- składowe symetryczne prądu transformatora **T1** na poziomie nN – wzór (1.9):

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_{0T1D} \\ \underline{I}_{1T1D} \\ \underline{I}_{2T1D} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -0,683 + j0,830 \\ 1,060 + j0,176 \\ -0,377 - j1,006 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -0,683 + j0,830 \\ 0 \end{bmatrix} kA$$

- składowe symetryczne prądu transformatora **T1** na poziomie SN – wzór (1.10):

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_{0T1G} \\ \underline{I}_{1T1G} \\ \underline{I}_{2T1G} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{\underline{I}_{1T1D}}{\vartheta_{GDT1}} \cdot e^{jh_{T1} \cdot 30^\circ} \\ \frac{\underline{I}_{2T1D}}{\vartheta_{GDT1}} \cdot e^{-jh_{T1} \cdot 30^\circ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ -0,683 + j0,830 \\ 2,5 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot e^{j11 \cdot 30^\circ} = \begin{bmatrix} 0 \\ -0,071 + j0,424 \\ 0 \end{bmatrix} kA$$

- składowe fazowe prądu transformatora **T1** na poziomie SN – wzór (1.11):

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_{T1GA} \\ \underline{I}_{T1GB} \\ \underline{I}_{T1GC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ \underline{I}_{1T1G} \\ \underline{I}_{2T1G} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ -0,071 + j0,424 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,071 + j0,424 \\ 0,402 - j0,151 \\ -0,332 - j0,273 \end{bmatrix} kA$$

- składowe symetryczne prądu transformatora **T2** na poziomie nN – wzór (1.9):

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_{0T2D} \\ \underline{I}_{1T2D} \\ \underline{I}_{2T2D} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 7,915 - j8,926 \\ -11,687 - j2,392 \\ 3,772 + j11,317 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 7,915 - j8,926 \\ 0 \end{bmatrix} kA$$

- składowe symetryczne prądu transformatora **T2** na poziomie SN – wzór (1.10):

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_{0T2G} \\ \underline{I}_{1T2G} \\ \underline{I}_{2T2G} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{\underline{I}_{1T2D}}{\vartheta_{GDT2}} \cdot e^{jh_{T2} \cdot 30^\circ} \\ \frac{\underline{I}_{2T2D}}{\vartheta_{GDT2}} \cdot e^{-jh_{T2} \cdot 30^\circ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 7,915 - j8,926 \\ 37,5 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot e^{j5 \cdot 30^\circ} = \begin{bmatrix} 0 \\ -0,064 + j0,312 \\ 0 \end{bmatrix} kA$$

- składowe fazowe prądu transformatora **T2** na poziomie SN – wzór (1.11):

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_{T2GA} \\ \underline{I}_{T2GB} \\ \underline{I}_{T2GC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ \underline{I}_{1T2G} \\ \underline{I}_{2T2G} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ -0,064 + j0,312 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,064 + j0,312 \\ 0,302 - j0,101 \\ -0,238 - j0,211 \end{bmatrix} kA$$

Podsumowując – otrzymaliśmy wektor prądów węzłowych (1.12), na podstawie którego będą obliczone wartości strat napięć sieciowych na podstawie macierzy admitancyjne (impedancyjne) węzłowej:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \underline{I}_{T1A} \\ \underline{I}_{T1B} \\ \underline{I}_{T1C} \\ \underline{I}_{T2A} \\ \underline{I}_{T2B} \\ \underline{I}_{T2C} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -0,071 + j0,424 \\ 0,402 - j0,151 \\ -0,332 - j0,273 \\ -0,064 + j0,312 \\ 0,302 - j0,101 \\ -0,238 - j0,211 \end{bmatrix} kA$$

3.4. Obliczenia iteracyjne

Obliczenia iteracyjne oparte są na macierzy admitancyjnej węzłowej dla zastępczego układu sieciowego jak na (Rys. 1.2) – na poziomie SN. Elementy macierzy admitancyjnej są obliczane na podstawie wzorów (1.2). Dla przyjętych w przykładzie obliczeniowym impedancji jest:

$$Y_{11} = Y_{22} = Y_{33} = \frac{1}{Z_{WNA} + Z_{TRA}} + \frac{1}{Z_{L1A}} = \frac{1}{(0,0494 + j0,0865) + (0,0610 + j1,3068)} + \frac{1}{(0,6000 + j1,7000)} = (0,241239 - j1,237059)$$

$$Y_{44} = Y_{55} = Y_{66} = \frac{1}{Z_{L1}} + \frac{1}{Z_{L2}} = \frac{1}{(0,6000 + j1,7000)} + \frac{1}{(0,24000 + j0,6800)} = (0,646154 - j1,830769)$$

$$Y_{77} = Y_{88} = Y_{99} = \frac{1}{Z_{L2}} = \frac{1}{(0,24000 + j0,6800)} = (0,461538 - j1,307692)$$

$$Y_{14} = Y_{41} = Y_{25} = Y_{52} = Y_{36} = Y_{63} = -\frac{1}{(0,6000 + j1,7000)} = (-0,184615 + j0,523077)$$

$$Y_{47} = Y_{74} = Y_{58} = Y_{85} = Y_{69} = Y_{96} = -\frac{1}{(0,24000 + j0,6800)} = (-0,461538 + j1,307692)$$

Wpisując te elementy otrzymamy macierz admitancyjną węzłową, na podstawie której utworzone jest równanie do obliczanie napięć węzłowych:

		1	2	3	4	5	6	7	8	9		
$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -0.071 \\ 0.424 \\ 0.402 \\ -0.151 \\ -0.332 \\ -0.273 \\ -0.064 \\ 0.312 \\ 0.302 \\ -0.101 \\ -0.238 \\ -0.211 \end{bmatrix}$	1	0.241239	0.000000	0.000000	-0.184615	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	$\Delta U_1 = ?$
		-1.237059	0.000000	0.000000	0.523077	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	$\Delta U_2 = ?$
	2	0.000000	0.241239	0.000000	0.000000	-0.184615	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	$\Delta U_3 = ?$
		0.000000	-1.237059	0.000000	0.000000	0.523077	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	$\Delta U_4 = ?$
	3	0.000000	0.000000	0.241239	0.000000	0.000000	-0.184615	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	$\Delta U_5 = ?$
		0.000000	0.000000	-1.237059	0.000000	0.000000	0.523077	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	$\Delta U_6 = ?$
	4	-0.184615	0.000000	0.000000	0.646154	0.000000	0.000000	-0.461538	0.000000	0.000000	0.000000	$\Delta U_7 = ?$
		0.523077	0.000000	0.000000	-1.830769	0.000000	0.000000	1.307692	0.000000	0.000000	0.000000	$\Delta U_8 = ?$
	5	0.000000	-0.184615	0.000000	0.000000	0.646154	0.000000	0.000000	-0.461538	0.000000	0.000000	$\Delta U_9 = ?$
	0.000000	0.523077	0.000000	0.000000	-1.830769	0.000000	0.000000	1.307692	0.000000	0.000000	$\Delta U_9 = ?$	
6	0.000000	0.000000	-0.184615	0.000000	0.000000	0.646154	0.000000	0.000000	0.000000	-0.461538	$\Delta U_9 = ?$	
	0.000000	0.000000	0.523077	0.000000	0.000000	-1.830769	0.000000	0.000000	0.000000	1.307692	$\Delta U_9 = ?$	
7	0.000000	0.000000	0.000000	-0.461538	0.000000	0.000000	0.461538	0.000000	0.000000	0.000000	$\Delta U_9 = ?$	
	0.000000	0.000000	0.000000	1.307692	0.000000	0.000000	-1.307692	0.000000	0.000000	0.000000	$\Delta U_9 = ?$	
8	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	-0.461538	0.000000	0.000000	0.000000	0.461538	0.000000	$\Delta U_9 = ?$	
	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.307692	0.000000	0.000000	0.000000	-1.307692	0.000000	$\Delta U_9 = ?$	
9	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	-0.461538	0.000000	0.000000	0.000000	0.461538	$\Delta U_9 = ?$	
	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.307692	0.000000	0.000000	0.000000	-1.307692	$\Delta U_9 = ?$	

Rozwiązanie jest:

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	
-1.039 -0.106	1	0.110382	0.000000	0.000000	0.110382	0.000000	0.000000	0.110382	0.000000	0.000000	0
		1.391841	0.000000	0.000000	1.391841	0.000000	0.000000	1.391841	0.000000	0.000000	0
0.428 0.952	2	0.000000	0.110382	0.000000	0.000000	0.110382	0.000000	0.000000	0.110382	0.000000	0
		0.000000	1.391841	0.000000	0.000000	1.391841	0.000000	0.000000	1.391841	0.000000	0
0.611 -0.847	3	0.000000	0.000000	0.110382	0.000000	0.000000	0.110382	0.000000	0.000000	0.110382	0
		0.000000	0.000000	1.391841	0.000000	0.000000	1.391841	0.000000	0.000000	1.391841	0
-2.370 0.107	4	0.110382	0.000000	0.000000	0.710382	0.000000	0.000000	0.710382	0.000000	0.000000	-0.071
		1.391841	0.000000	0.000000	3.091841	0.000000	0.000000	3.091841	0.000000	0.000000	0.424
1.278 1.999	5	0.000000	0.110382	0.000000	0.000000	0.710382	0.000000	0.000000	0.710382	0.000000	0.402
		0.000000	1.391841	0.000000	0.000000	3.091841	0.000000	0.000000	3.091841	0.000000	-0.151
1.092 -2.106	6	0.000000	0.000000	0.110382	0.000000	0.000000	0.710382	0.000000	0.000000	0.710382	-0.332
		0.000000	0.000000	1.391841	0.000000	0.000000	3.091841	0.000000	0.000000	3.091841	-0.273
-2.597 0.139	7	0.110382	0.000000	0.000000	0.710382	0.000000	0.000000	0.950382	0.000000	0.000000	-0.064
		1.391841	0.000000	0.000000	3.091841	0.000000	0.000000	3.771841	0.000000	0.000000	0.312
1.419 2.180	8	0.000000	0.110382	0.000000	0.000000	0.710382	0.000000	0.000000	0.950382	0.000000	0.302
		0.000000	1.391841	0.000000	0.000000	3.091841	0.000000	0.000000	3.771841	0.000000	-0.101
1.178 -2.218	9	0.000000	0.000000	0.110382	0.000000	0.000000	0.710382	0.000000	0.000000	0.950382	-0.238
		0.000000	0.000000	1.391841	0.000000	0.000000	3.091841	0.000000	0.000000	3.771841	-0.211

Obliczone wartości strat napięć to różnice napięć pomiędzy napięciami zasilania w sieci rzeczywistej E'_A, E'_B, E'_C a napięciami węzłowymi węzłów 1 ÷ 9,

stąd napięcia węzłowe są:

$$\begin{aligned} \underline{U}_{TRDA}^{(1)} = \underline{U}_1 &= \underline{E}'_A - \underline{\Delta U}_1^{(1)} = (-4,970 + j8,609) - (-1,039 - j0,106) = (-3,932 + j8,714) \\ \underline{U}_{TRDB}^{(1)} = \underline{U}_2 &= \underline{E}'_B - \underline{\Delta U}_2^{(1)} = (9,940 - j0,000) - (0,428 + j0,952) = (9,513 - j0,952) \\ \underline{U}_{TRDC}^{(1)} = \underline{U}_3 &= \underline{E}'_C - \underline{\Delta U}_3^{(1)} = (-4,970 - j8,609) - (0,611 - j0,847) = (-5,581 - j7,762) \\ \underline{U}_{T1GA}^{(1)} = \underline{U}_4 &= \underline{E}'_A - \underline{\Delta U}_4^{(1)} = (-4,970 + j8,609) - (-2,370 + j0,107) = (-2,600 + j8,501) \\ \underline{U}_{T1GB}^{(1)} = \underline{U}_5 &= \underline{E}'_B - \underline{\Delta U}_5^{(1)} = (9,940 - j0,000) - (1,278 + j1,999) = (8,663 - j1,999) \\ \underline{U}_{T1GC}^{(1)} = \underline{U}_6 &= \underline{E}'_C - \underline{\Delta U}_6^{(1)} = (-4,970 - j8,609) - (1,092 - j2,106) = (-6,062 - j6,503) \\ \underline{U}_{T2GA}^{(1)} = \underline{U}_7 &= \underline{E}'_A - \underline{\Delta U}_7^{(1)} = (-4,970 + j8,609) - (-2,597 + j0,139) = (-2,373 + j8,470) \\ \underline{U}_{T2GB}^{(1)} = \underline{U}_8 &= \underline{E}'_B - \underline{\Delta U}_8^{(1)} = (9,940 - j0,000) - (1,419 + j2,180) = (8,522 - j2,180) \\ \underline{U}_{T2GC}^{(1)} = \underline{U}_9 &= \underline{E}'_C - \underline{\Delta U}_9^{(1)} = (-4,970 - j8,609) - (1,178 - j2,218) = (-6,149 - j6,290) \end{aligned}$$

Największa zmiana napięcia jest dla \underline{U}_{T2GB} i wynosi $\mathbf{Maks } dU = |9,940 - 8,522| + |0,000 - (-2,180)| = \mathbf{3,598}$ – jest to wskaźnik, który powinien dążyć do zera w przypadku zbieżnego procesu iteracyjnego.

3.5. Obliczenie napięć transformatorów T1, T2, po pierwszej iteracji

Należy najpierw obliczone napięcia na stronach górnych transformatorów T1, T2, przetransformować na strony dolne (niskiego napięcia). Należy najpierw obliczyć składowe symetryczne napięć strony górnej, przetransformować je na stronę dolną, a następnie przeliczyć na składowe fazowe.

- Obliczenia dla transformatora T1:

Składowe symetryczne T1:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_{0T1G} \\ \underline{U}_{1T1G} \\ \underline{U}_{2T1G} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{U}_{T1GA} \\ \underline{U}_{T1GB} \\ \underline{U}_{T1GC} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -2,600 + j8,501 \\ 8,663 - j1,999 \\ -6,062 - j6,503 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -2,600 + j8,501 \\ 0 \end{bmatrix} kV$$

Transformacja składowych symetrycznych na dolną stronę transformatora T1:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_{0T1D} \\ \underline{U}_{1T1D} \\ \underline{U}_{2T1D} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{\underline{U}_{1T1G}}{\vartheta_{GDT1}} \cdot e^{-j\theta_{T1} \cdot 30^\circ} \\ \frac{\underline{U}_{2T1G}}{\vartheta_{GDT1}} \cdot e^{j\theta_{T1} \cdot 30^\circ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ -2,600 + j8,501 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot e^{-j5 \cdot 30^\circ} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1,040 + j3,401 \\ 0 \end{bmatrix} kV$$

Składowe fazowe napięć transformatora T1 na poziomie nN (po pierwszej iteracji):

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_{T1DA}^{(1)} \\ \underline{U}_{T1DB}^{(1)} \\ \underline{U}_{T1DC}^{(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{U}_{0T1D} \\ \underline{U}_{1T1D} \\ \underline{U}_{2T1D} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 1,040 + j3,401 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2,601 - j2,425 \\ -3,401 - j1,040 \\ 0,799 + j3,465 \end{bmatrix} kV$$

- Obliczenia dla transformatora T2:

Składowe symetryczne T2:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_{0T2G} \\ \underline{U}_{1T2G} \\ \underline{U}_{2T2G} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{U}_{T2GA} \\ \underline{U}_{T2GB} \\ \underline{U}_{T2GC} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -2,373 + j8,470 \\ 8,522 - j2,180 \\ -6,149 - j6,290 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -2,373 + j8,407 \\ 0 \end{bmatrix} kV$$

Transformacja składowych symetrycznych na dolną stronę transformatora T2:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_{0T2D} \\ \underline{U}_{1T2D} \\ \underline{U}_{2T2D} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{\underline{U}_{1T2G}}{\vartheta_{GDT2}} \cdot e^{-j\theta_{T2} \cdot 30^\circ} \\ \frac{\underline{U}_{2T2G}}{\vartheta_{GDT2}} \cdot e^{j\theta_{T2} \cdot 30^\circ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ -2,373 + j8,407 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot e^{-j5 \cdot 30^\circ} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0,168 - j0,164 \\ 0 \end{bmatrix} kV$$

Składowe fazowe napięć transformatora T2 na poziomie nN (po pierwszej iteracji):

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_{T2DA}^{(1)} \\ \underline{U}_{T2DB}^{(1)} \\ \underline{U}_{T2DC}^{(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{U}_{0T2D} \\ \underline{U}_{1T2D} \\ \underline{U}_{2T2D} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0,168 - j0,164 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,168 - j0,164 \\ -0,226 - j0,063 \\ 0,058 + j0,227 \end{bmatrix} kV$$

Przekształcenie te są dość oczywiste dla obciążenia symetrycznego gdzie nie występują składowe zerowe i przeciwne napięć, natomiast dla obciążeń niesymetrycznych, bądź dla niesymetrycznych parametrów linii, będą występowały wszystkie składowe, a obliczenia trzeba prowadzić według powyżej zastosowanych zasad.

3.6. Korekcja prądów – odbiorów po pierwszej iteracji

Po pierwszej iteracji otrzymano nowe napięcia na transformatorach T1, T2, tak więc dla zadanych mocy odbiorów należy obliczyć nowe prądy:

- prądy odbiorów podłączonych do transformatora T1 na poziomie nN:

$$\underline{I}_{T1DA}^{(2)} = \frac{S_{T1A}^*}{U_{T1DA}^{(1)*}} = \frac{4,00 - j1,50}{2,601 + j2,425} = (0,535 - j1,076)kA$$

$$\underline{I}_{T1DB}^{(2)} = \frac{S_{T1B}^*}{U_{T1DB}^{(1)*}} = \frac{4,00 - j1,50}{-3,401 - j1,040} = (-1,799 + j0,074)kA$$

$$\underline{I}_{T1DC}^{(2)} = \frac{S_{T1C}^*}{U_{T1DC}^{(1)*}} = \frac{4,00 - j1,50}{0,799 + j3,465} = (0,664 + j1,001)kA$$

- prądy odbiorów podłączonych do transformatora T2 na poziomie nN:

$$\underline{I}_{T2DA}^{(2)} = \frac{S_{T2A}^*}{U_{T2DA}^{(1)*}} = \frac{3,00 - j1,00}{0,168 + j0,164} = (6,166 - j11,989)kA$$

$$\underline{I}_{T2DB}^{(2)} = \frac{S_{T2B}^*}{U_{T2DB}^{(1)*}} = \frac{3,00 - j1,00}{-0,226 + j0,063} = (-13,466 + j0,654)kA$$

$$\underline{I}_{T2DC}^{(2)} = \frac{S_{T2C}^*}{U_{T2DC}^{(1)*}} = \frac{3,00 - j1,30}{0,058 - j0,227} = (7,300 + j11,334)kA$$

Następnym krokiem jest transformacja tych prądów na stronę górną (SN) transformatorów T1,T2.

- składowe symetryczne prądu transformatora **T1** na poziomie nN – wzór (1.9):

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_{0T1D} \\ \underline{I}_{1T1D} \\ \underline{I}_{2T1D} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0,535 - j1,076 \\ -1,799 + j0,074 \\ 0,664 + j1,001 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \\ 0,535 - j1,076 & \\ 0 & \end{bmatrix} kA$$

- składowe symetryczne prądu transformatora **T1** na poziomie SN – wzór (1.10):

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_{0T1G} \\ \underline{I}_{1T1G} \\ \underline{I}_{2T1G} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \underline{\vartheta}_{GDT1} \cdot e^{jh_{T1} \cdot 30^\circ} \\ \underline{\vartheta}_{GDT1} \cdot e^{-jh_{T1} \cdot 30^\circ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{0,535 - j1,076}{2,5} \cdot e^{j5 \cdot 30^\circ} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \\ 0,030 + j0,480 & \\ 0 & \end{bmatrix} kA$$

- składowe fazowe prądu transformatora **T1** na poziomie SN – wzór (1.11):

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_{T1GA} \\ \underline{I}_{T1GB} \\ \underline{I}_{T1GC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ \underline{I}_{1T1G} \\ \underline{I}_{2T1G} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0,030 + j0,480 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,030 + j0,480 \\ 0,400 - j0,266 \\ -0,430 - j0,214 \end{bmatrix} kA$$

- składowe symetryczne prądu transformatora **T2** na poziomie nN – wzór (1.9):

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_{0T2D} \\ \underline{I}_{1T2D} \\ \underline{I}_{2T2D} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 6,166 - j11,989 \\ -13,466 + j0,654 \\ 7,300 + j11,334 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \\ 6,166 - j11,989 & \\ 0 & \end{bmatrix} kA$$

- składowe symetryczne prądu transformatora T1 na poziomie SN – wzór (1.10):

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_{0T2G} \\ \underline{I}_{1T2G} \\ \underline{I}_{2T2G} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \underline{\vartheta}_{GDT2} \cdot e^{jh_{T2} \cdot 30^\circ} \\ \underline{\vartheta}_{GDT2} \cdot e^{-jh_{T2} \cdot 30^\circ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{6,166 - j11,989}{37,5} \cdot e^{j5 \cdot 30^\circ} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \\ 0,017 + j0,359 & \\ 0 & \end{bmatrix} kA$$

- składowe fazowe prądu transformatora T1 na poziomie SN – wzór (1.11):

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_{T2GA} \\ \underline{I}_{T2GB} \\ \underline{I}_{T2GC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ \underline{I}_{1T2G} \\ \underline{I}_{2T2G} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0,017 + j0,359 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,017 + j0,359 \\ 0,302 - j0,195 \\ -0,320 - j0,164 \end{bmatrix} kA$$

3.7. Nowe napięcia i prądy węzłowe

Podsumowując – otrzymaliśmy wektor prądów węzłowych (1.12), na podstawie którego będą obliczone wartości strat napięć sieciowych w kroku drugim:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ I_{T1GA} \\ I_{T1GB} \\ I_{T1GC} \\ I_{T2GA} \\ I_{T2GB} \\ I_{T2GC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0,030 + j0,480 \\ 0,400 - j0,266 \\ -0,430 - j0,214 \\ 0,017 + j0,359 \\ 0,302 - j0,159 \\ -0,320 - j0,164 \end{bmatrix} \text{ kA}$$

Po wymnożeniu wektora prądów przez inwersję macierzy admitancyjnej otrzymujemy wektor strat napięć w kroku drugim i nowe napięcia węzłowe:

$$\begin{aligned} \underline{U}_{TRDA}^{(2)} = \underline{U}_1 &= E'_A - \Delta \underline{U}_1^{(2)} = (-4,970 + j8,609) - (-1,162 + j0,158) = (-3,808 + j8,450) \\ \underline{U}_{TRDB}^{(2)} = \underline{U}_2 &= E'_B - \Delta \underline{U}_2^{(2)} = (9,940 - j0,000) - (0,718 + j0,927) = (9,222 - j0,927) \\ \underline{U}_{TRDC}^{(2)} = \underline{U}_3 &= E'_C - \Delta \underline{U}_3^{(2)} = (-4,970 - j8,609) - (0,444 - j1,086) = (-5,414 - j7,523) \\ \underline{U}_{T1GA}^{(2)} = \underline{U}_4 &= E'_A - \Delta \underline{U}_4^{(2)} = (-4,970 + j8,609) - (-2,560 + j0,742) = (-2,411 + j7,867) \\ \underline{U}_{T1GB}^{(2)} = \underline{U}_5 &= E'_B - \Delta \underline{U}_5^{(2)} = (9,940 - j0,000) - (1,922 + j1,846) = (8,018 - j1,846) \\ \underline{U}_{T1GC}^{(2)} = \underline{U}_6 &= E'_C - \Delta \underline{U}_6^{(2)} = (-4,970 - j8,609) - (0,637 - j2,588) = (-5,608 - j6,021) \\ \underline{U}_{T2GA}^{(2)} = \underline{U}_7 &= E'_A - \Delta \underline{U}_7^{(2)} = (-4,970 + j8,609) - (-2,800 + j0,840) = (-2,171 + j7,769) \\ \underline{U}_{T2GB}^{(2)} = \underline{U}_8 &= E'_B - \Delta \underline{U}_8^{(2)} = (9,940 - j0,000) - (2,127 + j2,005) = (7,813 - j2,005) \\ \underline{U}_{T2GC}^{(2)} = \underline{U}_9 &= E'_C - \Delta \underline{U}_9^{(2)} = (-4,970 - j8,609) - (0,673 - j2,844) = (-5,643 - j5,764) \end{aligned}$$

Maksymalna zmiana napięcia w kroku drugim wyniosła **Maks dU = 1,0317**.

Powtarzając te obliczenia otrzymujemy w kolejnych iteracjach maksymalne zmiany napięć:

itr= 2	Maks dU	1,0317	>	0,001
itr= 3	Maks dU	0,3522	>	0,001
itr= 4	Maks dU	0,1326	>	0,001
itr= 5	Maks dU	0,0512	>	0,001
itr= 6	Maks dU	0,0201	>	0,001
itr= 7	Maks dU	0,0079	>	0,001
itr= 8	Maks dU	0,0031	>	0,001
itr= 9	Maks dU	0,0012	>	0,001
itr=10	Maks dU	0,0005	>	0,001

Założono dokładność iteracji Eps=0,001 i w efekcie uzyskano zbieżny proces iteracyjny, a po dziesięciu iteracjach obliczone napięcia są:

$$\begin{aligned} \underline{U}_{TRDA} &= \underline{U}_1 = E'_A - \Delta \underline{U}_1 = (-4,970 + j8,609) - (-1,295 + j0,215) = (-3,675 + j8,394) \\ \underline{U}_{TRDB} &= \underline{U}_2 = E'_B - \Delta \underline{U}_2 = (9,940 - j0,000) - (0,834 + j1,014) = (9,107 - j1,014) \\ \underline{U}_{TRDC} &= \underline{U}_3 = E'_C - \Delta \underline{U}_3 = (-4,970 - j8,609) - (0,462 - j1,229) = (-5,432 - j7,380) \\ \underline{U}_{T1GA} &= \underline{U}_4 = E'_A - \Delta \underline{U}_4 = (-4,970 + j8,609) - (-2,840 + j0,913) = (-2,131 + j7,696) \\ \underline{U}_{T1GB} &= \underline{U}_5 = E'_B - \Delta \underline{U}_5 = (9,940 - j0,000) - (2,210 + j2,003) = (7,730 - j2,003) \\ \underline{U}_{T1GC} &= \underline{U}_6 = E'_C - \Delta \underline{U}_6 = (-4,970 - j8,609) - (0,629 - j2,916) = (-5,600 - j5,693) \\ \underline{U}_{T2GA} &= \underline{U}_7 = E'_A - \Delta \underline{U}_7 = (-4,970 + j8,609) - (-3,106 + j1,032) = (-1,864 + j7,577) \\ \underline{U}_{T2GB} &= \underline{U}_8 = E'_B - \Delta \underline{U}_8 = (9,940 - j0,000) - (2,447 + j2,174) = (7,494 - j2,174) \\ \underline{U}_{T2GC} &= \underline{U}_9 = E'_C - \Delta \underline{U}_9 = (-4,970 - j8,609) - (0,660 - j3,206) = (-5,630 - j5,402) \end{aligned} \text{ kV}$$

a w ostatnim kroku wektor wynikowy prądów jest:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ I_{T1GA} \\ I_{T1GB} \\ I_{T1GC} \\ I_{T2GA} \\ I_{T2GB} \\ I_{T2GC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0,0474 + j0,5329 \\ 0,4378 - j0,3075 \\ -0,4852 - j0,2254 \\ 0,0326 + j0,4040 \\ 0,3335 - j0,2302 \\ -0,3661 - j0,1737 \end{bmatrix} \text{ kA}$$

3.8. Obliczanie napięć i prądów wynikowych w układzie przesyłowym

3.8.1. Obliczenia dla transformatora T2

Tab. 3.4. Napięcia na stronie górnej transformatora T2 po iteracjach

Napięcia fazowe - po iteracjach	Napięcia międzyfazowe
$\underline{U}_{T2GA} = (-1,864 + j7,577)kV = 7,803e^{j103,8^\circ}$	$\underline{U}_{T2GBA} = (-9,357 + j9,751)kV = 13,515e^{j133,8^\circ}$
$\underline{U}_{T2GB} = (7,494 - j2,174)kV = 7,803e^{j343,8^\circ}$	$\underline{U}_{T2GAC} = (-3,469 - j13,389)kV = 13,515e^{j253,8^\circ}$
$\underline{U}_{T2GC} = (-5,630 - j5,402)kV = 7,803e^{j223,8^\circ}$	$\underline{U}_{T2GCB} = (13,123 + j3,228)kV = 13,515e^{j13,8^\circ}$

Przeliczenie napięć strony górnej transformatora T2 na stronę dolną:

Składowe symetryczne T2:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_{T2G}^0 \\ \underline{U}_{T2G}^1 \\ \underline{U}_{T2G}^2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{U}_{T2GA} \\ \underline{U}_{T2GB} \\ \underline{U}_{T2GC} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -1,864 + j7,577 \\ 7,494 - j2,174 \\ -5,630 - j5,402 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -1,864 + j7,577 \\ 0 \end{bmatrix} kV$$

Transformacja składowych symetrycznych na dolną stronę transformatora T2:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_{T2D}^0 \\ \underline{U}_{T2D}^1 \\ \underline{U}_{T2D}^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{\underline{U}_{T2G}^0}{\vartheta_{GDT2}} \cdot e^{-jh_{T2} \cdot 30^\circ} \\ \frac{\underline{U}_{T2G}^2}{\vartheta_{GDT2}} \cdot e^{jh_{T2} \cdot 30^\circ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ -1,864 + j7,577 \cdot e^{-j5 \cdot 30^\circ} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0,144 - j0,150 \\ 0 \end{bmatrix} kV$$

Składowe fazowe napięć transformatora T2 na poziomie nN:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_{T2DA}^{(1)} \\ \underline{U}_{T2DB}^{(1)} \\ \underline{U}_{T2DC}^{(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{U}_{T2D}^0 \\ \underline{U}_{T2D}^1 \\ \underline{U}_{T2D}^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0,144 - j0,150 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,144 - j0,150 \\ -0,202 - j0,050 \\ 0,058 + j0,200 \end{bmatrix} kV$$

Tab. 3.5. Napięcia na stronie dolnej transformatora T2

Napięcia fazowe (strony dolnej)	Napięcia międzyfazowe
$\underline{U}_{T2DA} = (0,144 - j0,150)kV = 0,208e^{j313,8^\circ}$	$\underline{U}_{T2DBA} = (0,346 - j0,100)kV = 0,360e^{j343,8^\circ}$
$\underline{U}_{T2DB} = (-0,202 - j0,050)kV = 0,208e^{j193,8^\circ}$	$\underline{U}_{T2DAC} = (-0,086 + j0,350)kV = 0,360e^{j103,8^\circ}$
$\underline{U}_{T2DC} = (0,058 + j0,200)kV = 0,208e^{j73,8^\circ}$	$\underline{U}_{T2DCB} = (-0,260 - j0,250)kV = 0,360e^{j223,8^\circ}$

Tab. 3.6. Prądy w transformatorze T2

Strona górna – po iteracjach	Strona dolna (z obliczeń mocy i napięć strony dolnej)
$\underline{I}_{T2GA} = (0,033 + j0,404)kA \quad \underline{I}_{T2GA} = 405A$	$\underline{I}_{T2DA} = \frac{S_{T2A}^*}{U_{T2DA}^*} = \frac{3,00 - j1,00}{0,144 + j0,150} = (6,515 - j13,730)kA \quad \underline{I}_{T2DA} = 15198A$
$\underline{I}_{T2GB} = (0,334 - j0,230)kA \quad \underline{I}_{T2GB} = 405A$	$\underline{I}_{T2DB} = \frac{S_{T2B}^*}{U_{T2DB}^*} = \frac{3,00 - j1,00}{-0,202 + j0,050} = (-15,148 + j12,23)kA \quad \underline{I}_{T2DB} = 15198A$
$\underline{I}_{T2GC} = (-0,366 - j0,174)kA \quad \underline{I}_{T2GC} = 405A$	$\underline{I}_{T2DC} = \frac{S_{T2C}^*}{U_{T2DC}^*} = \frac{3,00 - j1,00}{0,058 + j0,200} = (8,633 + j12,507)kA \quad \underline{I}_{T2DC} = 15198A$

Tab. 3.7. Moce w transformatorze T2

Strona górna	Strona dolna (z danych do obliczeń)
$\underline{S}_{T2GA} = U_{T2GA} \cdot I_{T2GA}^* = (-1,864 + j7,577) \cdot (0,033 - j0,404) = 3,00MW - j1,00Mvar$	$\underline{S}_{T2DA} = 3,00MW + j1,00Mvar$
$\underline{S}_{T2GB} = U_{T2GA} \cdot I_{T2GA}^* = (7,494 - j2,174) \cdot (0,334 + j0,230) = 3,00MW + j1,00Mvar$	$\underline{S}_{T2DB} = 3,00MW + j1,00Mvar$
$\underline{S}_{T2GC} = U_{T2GC} \cdot I_{T2GC}^* = (-5,630 - j5,402) \cdot (-0,366 + j0,174) = 3,00MW + j1,00Mvar$	$\underline{S}_{T2DC} = 3,00MW + j1,00Mvar$
$\underline{S}_{T2G} = (3,00 + j1,00) + (3,00 + j1,00) + (3,00 + j1,00) = 9,00MW + j3,00Mvar$	$\underline{S}_{T2D} = 9,00MW + j3,00Mvar$

3.8.2. Obliczenia dla transformatora T1

Tab. 3.8. Napięcia na stronie górnej transformatora T1 po iteracjach

Napięcia fazowe (strony górnej z wyników po iteracjach)	Napięcia międzyfazowe
$\underline{U}_{T1GA} = (-2,131 + j7,696)kV = 7,985e^{j105,5^\circ}$	$\underline{U}_{T1GBA} = (-9,861 + j9,699)kV = 13,831e^{j135,5^\circ}$
$\underline{U}_{T1GB} = (7,703 - j2,003)kV = 7,985e^{j345,5^\circ}$	$\underline{U}_{T1GAC} = (-3,469 - j13,389)kV = 13,831e^{j255,5^\circ}$
$\underline{U}_{T1GC} = (-5,600 - j5,693)kV = 7,985e^{j225,5^\circ}$	$\underline{U}_{T1GB} = (13,330 + j3,690)kV = 13,831e^{j15,5^\circ}$

Przeliczenie napięć strony górnej transformatora T1 na stronę dolną:

Składowe symetryczne T1:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_{T1G} \\ \underline{U}_{T1B} \\ \underline{U}_{T1C} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{U}_{T1GA} \\ \underline{U}_{T1GB} \\ \underline{U}_{T1GC} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -2,131 + j7,696 \\ 7,703 - j2,003 \\ -5,600 - j6,693 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -2,131 + j7,696 \\ 0 \end{bmatrix} kV$$

Transformacja składowych symetrycznych na dolną stronę transformatora T1:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_{T1D} \\ \underline{U}_{T1B} \\ \underline{U}_{T1C} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \underline{U}_{T1G} \cdot e^{-jh_{T1} \cdot 30^\circ} \\ \underline{U}_{T1G} \cdot e^{jh_{T1} \cdot 30^\circ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ -2,131 + j7,696 \\ 2,5 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot e^{-j11 \cdot 30^\circ} = \begin{bmatrix} 0 \\ -2,277 + j2,240 \\ 0 \end{bmatrix} kV$$

Składowe fazowe napięć transformatora T1 na poziomie nN:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_{T1DA}^{(1)} \\ \underline{U}_{T1DB}^{(1)} \\ \underline{U}_{T1DC}^{(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{U}_{T1D} \\ \underline{U}_{T1B} \\ \underline{U}_{T1C} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ -2,277 + j2,240 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2,277 + j2,240 \\ 3,078 + j0,852 \\ -0,801 - j3,092 \end{bmatrix} kV$$

Tab. 3.9. Napięcia na stronie dolnej transformatora T1

Napięcia fazowe	Napięcia międzyfazowe
$\underline{U}_{T1DA} = (-2,277 + j2,240)kV = 3,194e^{j135,5^\circ}$	$\underline{U}_{T1DBA} = (-5,356 + j1,388)kV = 5,532e^{j165,5^\circ}$
$\underline{U}_{T1DB} = (3,078 + j0,852)kV = 3,194e^{j15,5^\circ}$	$\underline{U}_{T1DAC} = (1,476 - j5,332)kV = 5,532e^{j285,5^\circ}$
$\underline{U}_{T1DC} = (-0,801 - j3,092)kV = 3,194e^{j225,5^\circ}$	$\underline{U}_{T1DCB} = (3,879 + j3,944)kV = 5,532e^{j45,5^\circ}$

Tab. 3.10. Prądy w transformatorze T1

Strona góra	Strona dolna
$\underline{I}_{T1GA} = (0,0474 + j0,5329)kA \quad \underline{I}_{T1GA} = 535A$	$\underline{I}_{T1DA} = \frac{S_{T1A}^*}{U_{T1DA}^*} = \frac{4,00 - j1,50}{2,277 + j2,240} = (0,563 - j1,213)kA \quad \underline{I}_{T1DA} = 1337A$
$\underline{I}_{T1GB} = (0,4378 - j0,3075)kA \quad \underline{I}_{T1GB} = 535A$	$\underline{I}_{T1DB} = \frac{S_{T1B}^*}{U_{T1DB}^*} = \frac{4,00 - j1,50}{-3,078 + j0,852} = (-1,332 + j0,118)kA \quad \underline{I}_{T1DB} = 1337A$
$\underline{I}_{T1GC} = (-0,4852 - j0,2254)kA \quad \underline{I}_{T1GC} = 535A$	$\underline{I}_{T1DC} = \frac{S_{T1C}^*}{U_{T1DC}^*} = \frac{4,00 - j1,50}{0,801 - j3,092} = (0,769 + j1,094)kA \quad \underline{I}_{T1DC} = 1337A$

Tab. 3.11. Moce w transformatorze T1

Strona góra	Strona dolna (z danych do obliczeń)
$\underline{S}_{T1GA} = U_{T1GA} \cdot I_{T1GA}^* = (-2,131 + j7,696) \cdot (0,047 - j0,533) = 4,00MW + j1,50Mvar$	$\underline{S}_{T1DA} = 4,00MW + j1,50Mvar$
$\underline{S}_{T1GB} = U_{T1GA} \cdot I_{T1GA}^* = (7,703 - j2,003) \cdot (0,438 + j0,307) = 4,00MW + j1,50Mvar$	$\underline{S}_{T1DB} = 4,00MW + j1,50Mvar$
$\underline{S}_{T1GC} = U_{T1GC} \cdot I_{T1GC}^* = (-5,600 - j5,693) \cdot (-0,485 + j0,225) = 3,00MW + j1,00Mvar$	$\underline{S}_{T1DC} = 4,00MW + j1,50Mvar$
$\underline{S}_{T1G} = (4,00 + j1,50) + (4,00 + j1,50) + (4,00 + j1,50) = 12,00MW + j4,50Mvar$	$\underline{S}_{T1D} = 12,00MW + j4,50Mvar$

3.8.3. Obliczenia dla transformatora TR

Tab. 3.12. Napięcia na stronie dolnej transformatora TR po iteracjach

Napięcia fazowe	Napięcia międzyfazowe
$\underline{U}_{TRDA} = (-3,675 + j8,394)kV = 9,163e^{j113,6^\circ}$	$\underline{U}_{TRDBA} = (-12,782 + j9,408)kV = 15,871e^{j143,6^\circ}$
$\underline{U}_{TRDB} = (9,107 - j1,014)kV = 9,163e^{j353,6^\circ}$	$\underline{U}_{TRDAC} = (-1,757 - j15,774)kV = 15,871e^{j263,6^\circ}$
$\underline{U}_{TRGC} = (-5,432 - j7,380)kV = 9,163e^{j233,6^\circ}$	$\underline{U}_{TRDCB} = (14,539 + j6,366)kV = 15,871e^{j23,6^\circ}$

Brakuje jeszcze napięć na zaciskach górnych transformatora TR odniesionych do napięcia średniego, oraz napięć po stronie 110 kV. Należy więc najpierw obliczyć napięcia za impedancjami transformatora, a następnie te napięcia przetransformować na stronę górną transformatora TR, przez przekładnię zwojową i godzinową.

Przez transformator TR po stronie SN płynie suma prądów odbiorów.

- prądy płynące przez transformator TR po stronie dolnej (SN):

$$\underline{I}_{TRDA} = \underline{I}_{T1GA} + \underline{I}_{T2GA} = (0,0474 + j0,5329) + (0,0326 + j0,4040) = (0,0800 + j0,9369)kA$$

$$\underline{I}_{TRDB} = \underline{I}_{T1GB} + \underline{I}_{T2GB} = (0,4378 - j0,3075) + (0,3326 - j0,2302) = (0,7704 - j0,5377)kA$$

$$\underline{I}_{TRDC} = \underline{I}_{T1GC} + \underline{I}_{T2GC} = (-0,4852 - j0,2254) + (-0,3661 - j0,1737) = (-0,8513 - j0,3991)kA$$

- napięcia za impedancją transformatora TR:

$$\underline{U}'_{TRGA} = \underline{U}_{TRDA} + \underline{Z}_{T1GA} \cdot \underline{I}_{TRDA} = (-3,675 + j8,394) + (0,610 + j1,3068) \cdot (0,0800 + j0,9369) = (-4,893 + j8,855)kV$$

$$\underline{U}'_{TRGB} = \underline{U}_{TRDB} + \underline{Z}_{T1GB} \cdot \underline{I}_{TRDB} = (9,107 - j1,014) + (0,610 + j1,3068) \cdot (0,7704 - j0,5377) = (9,856 - j0,040)kV$$

$$\underline{U}'_{TRGC} = \underline{U}_{TRDC} + \underline{Z}_{T1GC} \cdot \underline{I}_{TRDC} = (-5,432 - j7,380) + (0,610 + j1,3068) \cdot (-0,8513 - j0,3991) = (-4,963 - j8,515)kV$$

- składowe symetryczne napięć strony górnej transformatora TR odniesione do SN:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}'_{TRG0} \\ \underline{U}'_{TRG1} \\ \underline{U}'_{TRG2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{U}'_{TRGA} \\ \underline{U}'_{TRGB} \\ \underline{U}'_{TRGC} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -4,893 + j8,855 \\ 9,856 - j0,040 \\ -4,963 - j8,515 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -4,893 + j8,855 \\ 0 \end{bmatrix} kV$$

- transformacja składowych symetrycznych na górną stronę (110 kV) transformatora TR:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_{TRG0} \\ \underline{U}_{TRG1} \\ \underline{U}_{TRG2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \underline{U}'_{TRG1} \cdot \vartheta_{GDTR} e^{j\theta_{TR} 30^\circ} \\ \underline{U}'_{TRG2} \cdot \vartheta_{GDTR} e^{j\theta_{TR} 30^\circ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ (-4,893 + j8,855) \cdot 6,9697e^{j11-30^\circ} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0,280 + j68,692 \\ 0 \end{bmatrix} kV$$

- zamiana składowych symetrycznych na fazowe napięć TR na poziomie 110kV

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_{TRGA} \\ \underline{U}_{TRGB} \\ \underline{U}_{TRGC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{U}_{TRG0} \\ \underline{U}_{TRG1} \\ \underline{U}_{TRG2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0,280 + j68,692 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,280 + j68,692 \\ 59,350 - j34,588 \\ -59,629 - j34,104 \end{bmatrix} kV$$

Tab. 3.13. Napięcia na stronie górnej transformatora TR

Napięcia fazowe	Napięcia międzyfazowe
$\underline{U}_{TRGA} = (0,280 + j68,692)kV = 68,693e^{j89,8^\circ}$	$\underline{U}_{TRGBA} = (-59,861 + j104,281)kV = 118,980e^{j119,8^\circ}$
$\underline{U}_{TRGB} = (59,350 - j34,588)kV = 68,693e^{j329,8^\circ}$	$\underline{U}_{TRGAC} = (-59,909 - j102,796)kV = 118,980e^{j239,8^\circ}$
$\underline{U}_{TRGC} = (-59,629 - j34,104)kV = 68,693e^{j209,8^\circ}$	$\underline{U}_{TRGCB} = (118,979 - j0,481)kV = 118,980e^{j359,8^\circ}$

Tab. 3.14. Napięcia zasilające układ sieciowy

Napięcia fazowe	Napięcia międzyfazowe
$\underline{E}_A = (0,000 + j69,282)kV = 69,163e^{j90,0^\circ}$	$\underline{E}_{BA} = (-60,000 + j103,923)kV = 120,000e^{j120,0^\circ}$
$\underline{E}_B = (60,000 - j34,641)kV = 69,163e^{j330,0^\circ}$	$\underline{E}_{AC} = (-60,000 - j103,923)kV = 120,000e^{j240,0^\circ}$
$\underline{E}_C = (-60,000 - j34,641)kV = 69,163e^{j210,0^\circ}$	$\underline{E}_{CB} = (120,000 - j0,000)kV = 120,000e^{j360,0^\circ}$

3.9. Obliczenia rozprężu prądów i mocy

Z rozwiązania iteracyjnego układu znane są napięcia fazowe w węzłach sieci schematu zastępczego z (Rys. 1.2). Można więc obliczać przepływy prądów i mocy w kolejnych odcinkach sieci, najpierw średniego napięcia a dalej przepływy w transformatorze TR 110/SN i na końcu w linii WN 110 kV.

3.9.1. Obliczanie prądów i mocy w linii L2

Tab. 3.15. Napięcia prądy i moce w linii L2

Napięcia fazowe na początku linii L2 (na T1 SN)		Napięcia fazowe na końcu linii L2 (na T2 SN)	
$\underline{U}_{T1GA} = (-2,131 + j7,696)kV$		$\underline{U}_{T2GA} = (-1,864 + j7,577)kV$	
$\underline{U}_{T1GB} = (7,703 - j2,003)kV$		$\underline{U}_{T2GB} = (7,494 - j2,174)kV$	
$\underline{U}_{T1GC} = (-5,600 - j5,693)kV$		$\underline{U}_{T2GC} = (-5,630 - j5,402)kV$	
Impedancje linii L2			
$\underline{Z}_{L2A} = (0,240 + j0,680)\Omega$	$\underline{Z}_{L2B} = (0,240 + j0,680)\Omega$	$\underline{Z}_{L2C} = (0,240 + j0,680)\Omega$	
Prądy w linii L2			
$\underline{I}_{L2A} = \frac{\underline{U}_{T1GA} - \underline{U}_{T2GA}}{\underline{Z}_{L1A}} = \frac{(-2,131 + j7,696) - (-1,864 + j7,577)}{(0,240 + j0,680)} = (0,0326 + j0,4040)kA$		$ \underline{I}_{L2A} = 405A$	
$\underline{I}_{L2B} = \frac{\underline{U}_{T1GB} - \underline{U}_{T2GB}}{\underline{Z}_{L1B}} = \frac{(7,703 - j2,003) - (7,494 - j2,174)}{(0,240 + j0,680)} = (0,3335 - j0,2302)kA$		$ \underline{I}_{L2B} = 405A$	
$\underline{I}_{L2C} = \frac{\underline{U}_{T1GC} - \underline{U}_{T2GC}}{\underline{Z}_{L1C}} = \frac{(-5,600 - j5,693) - (-5,630 - j5,402)}{(0,240 + j0,680)} = (-0,3661 - j0,1737)kA$		$ \underline{I}_{L2C} = 405A$	
Moce w linii L2			
Moce na początku linii L2		Moce na końcu L2	
$\underline{S}_{L2Ap} = \underline{U}_{T1GA} \cdot \underline{I}_{L2A}^* = (-2,131 + j7,696) \cdot (0,0326 - j0,4040) = 3,039MW + j1,112Mvar$		$\underline{S}_{L2Ak} = \underline{U}_{T2GA} \cdot \underline{I}_{L2A}^* = (-1,864 + j7,577) \cdot (0,0326 - j0,4040) = 3,000MW + j1,000Mvar$	
$\underline{S}_{L2Bp} = \underline{U}_{T1GB} \cdot \underline{I}_{L2B}^* = (7,703 - j2,003) \cdot (0,3335 + j0,2302) = 3,039MW + j1,112Mvar$		$\underline{S}_{L2Bk} = \underline{U}_{T2GB} \cdot \underline{I}_{L2B}^* = (7,494 - j2,174) \cdot (0,3335 + j0,2302) = 3,000MW + j1,000Mvar$	
$\underline{S}_{L2Cp} = \underline{U}_{T1GC} \cdot \underline{I}_{L2C}^* = (-5,600 - j5,693) \cdot (-0,3661 + j0,1737) = 3,039MW + j1,112Mvar$		$\underline{S}_{L2Ck} = \underline{U}_{T2GC} \cdot \underline{I}_{L2C}^* = (-5,630 - j5,402) \cdot (-0,3661 + j0,1737) = 3,000MW + j1,000Mvar$	
Całkowity przepływ mocy na początku linii L2		Całkowity przepływ mocy na końcu linii L2	
$P_{L2p} = P_A + P_B + P_C = 3,039 + 3,039 + 3,039 = 9,118 MW$ $Q_{L2p} = Q_A + Q_B + Q_C = 1,112 + 1,112 + 1,112 = 3,336 Mvar$		$P_{L2k} = P_A + P_B + P_C = 3,000 + 3,000 + 3,000 = 9,000 MW$ $Q_{L2k} = Q_A + Q_B + Q_C = 1,000 + 1,000 + 1,000 = 3,000 Mvar$	
Straty mocy czynnej		Straty mocy biernej	
$\Delta P_A = R_{L2A} \cdot \underline{I}_{L2A} ^2 = 0,240 \cdot 0,405^2 = 0,039 MW$		$\Delta Q_A = X_{L2A} \cdot \underline{I}_{L2A} ^2 = 0,680 \cdot 0,405^2 = 0,112 Mvar$	
$\Delta P_B = R_{L2B} \cdot \underline{I}_{L2B} ^2 = 0,240 \cdot 0,405^2 = 0,039 MW$		$\Delta Q_B = X_{L1B} \cdot \underline{I}_{L2B} ^2 = 0,680 \cdot 0,405^2 = 0,112 Mvar$	
$\Delta P_C = R_{L2C} \cdot \underline{I}_{L2C} ^2 = 0,240 \cdot 0,405^2 = 0,039 MW$		$\Delta Q_C = X_{L2C} \cdot \underline{I}_{L2C} ^2 = 0,680 \cdot 0,405^2 = 0,112 Mvar$	
Suma strat mocy czynnej w linii L2		Suma strat mocy biernej w linii L2	
$\Delta P_{L2} = \Delta P_A + \Delta P_B + \Delta P_C = 0,039 + 0,039 + 0,039 = 0,118 MW$		$\Delta Q_{L2} = \Delta Q_A + \Delta Q_B + \Delta Q_C = 0,112 + 0,112 + 0,112 = 0,336 Mvar$	

3.9.2. Obliczanie prądów i mocy w linii L1

Tab. 3.16. Napięcia prądy i moce w linii L1

Napięcia fazowe na początku linii L1 (na TR SN)		Napięcia fazowe na końcu linii L1 (na T1 SN)	
$\underline{U}_{TRDA} = (-3,675 + j8,394)kV$		$\underline{U}_{T1GA} = (-2,131 + j7,696)kV$	
$\underline{U}_{TRDB} = (9,107 - j1,014)kV$		$\underline{U}_{T1GB} = (7,703 - j2,003)kV$	
$\underline{U}_{TR1GAC} = (-5,432 - j7,380)kV$		$\underline{U}_{T1GAC} = (-5,600 - j5,693)kV$	
Impedancje linii L1			
$\underline{Z}_{L1A} = (0,600 + j1,700)\Omega$	$\underline{Z}_{L1B} = (0,600 + j1,700)\Omega$	$\underline{Z}_{L1C} = (0,600 + j1,700)\Omega$	
Prądy w linii L1			
$\underline{I}_{L1A} = \frac{\underline{U}_{TRDA} - \underline{U}_{T1GA}}{\underline{Z}_{L1A}} = \frac{(-3,675 + j8,394) - (-2,131 + j7,696)}{(0,600 + j1,700)} = (0,0800 + j0,9386)kA$		$ \underline{I}_{L1A} = 940A$	
$\underline{I}_{L1B} = \frac{\underline{U}_{TRDB} - \underline{U}_{T1GB}}{\underline{Z}_{L1B}} = \frac{(9,107 - j1,014) - (7,703 - j2,003)}{(0,600 + j1,700)} = (0,7713 - j0,5377)kA$		$ \underline{I}_{L1B} = 940A$	
$\underline{I}_{L1C} = \frac{\underline{U}_{TRDC} - \underline{U}_{T1GC}}{\underline{Z}_{L1C}} = \frac{(-5,432 - j7,380) - (-5,600 - j5,693)}{(0,600 + j1,700)} = (-0,8513 - j0,3991)kA$		$ \underline{I}_{L1C} = 940A$	
Moce w linii L1			
Moce na początku linii L1		Moce na końcu L1	
$\underline{S}_{L1Ap} = \underline{U}_{TRDA} \cdot \underline{I}_{L1A}^* = (-3,675 + j8,394) \cdot (0,0800 - j0,9386) = 7,570MW + j4,114Mvar$		$\underline{S}_{L2Ak} = \underline{U}_{T1GA} \cdot \underline{I}_{L1A}^* = (-2,131 + j7,696) \cdot (0,0800 - j0,9386) = 7,039MW + j2,612Mvar$	
$\underline{S}_{L1Bp} = \underline{U}_{TRDB} \cdot \underline{I}_{L1B}^* = (9,107 - j1,014) \cdot (0,7713 + j0,5377) = 7,570MW + j4,114Mvar$		$\underline{S}_{L1Bk} = \underline{U}_{T1GB} \cdot \underline{I}_{L1B}^* = (7,703 - j2,003) \cdot (0,7713 + j0,5377) = 7,039MW + j2,612Mvar$	
$\underline{S}_{L1Cp} = \underline{U}_{TRDC} \cdot \underline{I}_{L1C}^* = (-5,432 - j7,380) \cdot (-0,8513 + j0,3991) = 7,570MW + j4,114Mvar$		$\underline{S}_{L1Ck} = \underline{U}_{T1GC} \cdot \underline{I}_{L1C}^* = (-5,600 - j5,693) \cdot (-0,8513 + j0,3991) = 7,039MW + j2,612Mvar$	
Całkowity przepływ mocy na początku linii L2		Całkowity przepływ mocy na końcu linii L2	
$P_{L1p} = P_A + P_B + P_C = 7,570 + 7,570 + 7,570 = 22,710 MW$ $Q_{L1p} = Q_A + Q_B + Q_C = 4,114 + 4,114 + 4,114 = 12,342 Mvar$		$P_{L1k} = P_A + P_B + P_C = 7,039 + 7,039 + 7,039 = 21,117 MW$ $Q_{L1k} = Q_A + Q_B + Q_C = 2,612 + 2,612 + 2,612 = 7,836 Mvar$	
Straty mocy czynnej		Straty mocy biernej	
$\Delta P_A = R_{L1A} \cdot \underline{I}_{L1A} ^2 = 0,600 \cdot 0,940^2 = 0,531 MW$		$\Delta Q_A = X_{L1A} \cdot \underline{I}_{L1A} ^2 = 1,700 \cdot 0,940^2 = 1,502 Mvar$	
$\Delta P_B = R_{L1B} \cdot \underline{I}_{L1B} ^2 = 0,600 \cdot 0,940^2 = 0,531 MW$		$\Delta Q_B = X_{L1B} \cdot \underline{I}_{L1B} ^2 = 1,700 \cdot 0,940^2 = 1,502 Mvar$	
$\Delta P_C = R_{L1C} \cdot \underline{I}_{L1C} ^2 = 0,600 \cdot 0,940^2 = 0,531 MW$		$\Delta Q_C = X_{L1C} \cdot \underline{I}_{L1C} ^2 = 1,700 \cdot 0,940^2 = 1,502 Mvar$	
Suma strat mocy czynnej w linii L2		Suma strat mocy biernej w linii L2	
$\Delta P_{L2} = \Delta P_A + \Delta P_B + \Delta P_C = 0,531 + 0,531 + 0,531 = 1,593 MW$		$\Delta Q_{L2} = \Delta Q_A + \Delta Q_B + \Delta Q_C = 1,502 + 1,502 + 1,502 = 4,506 Mvar$	

3.9.3. Obliczanie prądów i mocy w transformatorze TR

Tab. 3.17. Napięcia prądy i moce w transformatorze TR

Napięcia fazowe za impedancją transformatora		Napięcia fazowe na stronie dolnej transformatora	
$\underline{U}'_{TRGA} = (-4,893 + j8,855)kV$		$\underline{U}_{TRDA} = (-3,675 + j8,394)kV$	
$\underline{U}'_{TRGB} = (9,856 - j0,040)kV$		$\underline{U}_{TRDB} = (9,107 - j1,014)kV$	
$\underline{U}'_{TRGC} = (-4,963 - j8,515)kV$		$\underline{U}_{TRDC} = (-5,432 - j7,380)kV$	
Impedancje transformatora TR			
$\underline{Z}_{TRA} = (0,610 + j1,3068)\Omega$	$\underline{Z}_{TRB} = (0,610 + j1,3068)\Omega$	$\underline{Z}_{TRC} = (0,610 + j1,3068)\Omega$	
Prądy w transformatorze TR			
$\underline{I}_{TRA} = \frac{\underline{U}'_{TRGA} - \underline{U}_{TRDA}}{\underline{Z}_{TRA}} = \frac{(-4,893 + j8,855) - (-3,675 + j8,394)}{(0,610 + j1,3068)} = (0,0800 + j0,9386)kA$		$ \underline{I}_{TRA} = 940A$	
$\underline{I}_{TRB} = \frac{\underline{U}'_{TRGB} - \underline{U}_{TRDB}}{\underline{Z}_{TRB}} = \frac{(9,856 - j0,040) - (9,107 - j1,014)}{(0,610 + j1,3068)} = (0,7704 - j0,5377)kA$		$ \underline{I}_{TRB} = 940A$	
$\underline{I}_{TRC} = \frac{\underline{U}'_{TRGC} - \underline{U}_{TRDC}}{\underline{Z}_{TRC}} = \frac{(-4,963 - j8,515) - (-5,432 - j7,380)}{(0,610 + j1,3068)} = (-0,8513 - j0,3991)kA$		$ \underline{I}_{TRC} = 940A$	
Moce w transformatorze TR			
Moce na początku transformatora TR		Moce na końcu transformatora TR	
$\underline{S}_{TRAp} = \underline{U}'_{TRGA} \cdot \underline{I}_{TRA}^* = (-4,893 + j8,855) \cdot (0,0800 - j0,9386) = 7,623MW + j5,268Mvar$		$\underline{S}_{TRAk} = \underline{U}_{TRDA} \cdot \underline{I}_{TRA}^* = (-3,675 + j8,394) \cdot (0,0800 - j0,9386) = 7,570MW + j4,114Mvar$	
$\underline{S}_{TRBp} = \underline{U}'_{TRGB} \cdot \underline{I}_{TRB}^* = (9,856 - j0,040) \cdot (0,7713 + j0,5377) = 7,623MW + j5,268Mvar$		$\underline{S}_{TRBk} = \underline{U}_{TRDB} \cdot \underline{I}_{TRB}^* = (9,107 - j1,014) \cdot (0,7713 + j0,5377) = 7,570MW + j4,114Mvar$	
$\underline{S}_{TRCp} = \underline{U}'_{TRGC} \cdot \underline{I}_{TRC}^* = (-4,963 - j8,515) \cdot (-0,8513 + j0,3991) = 7,623MW + j5,268Mvar$		$\underline{S}_{TRCk} = \underline{U}_{TRDC} \cdot \underline{I}_{TRC}^* = (-5,432 - j7,380) \cdot (-0,8513 + j0,3991) = 7,570MW + j4,114Mvar$	
Całkowity przepływ mocy na początku transformatora TR		Całkowity przepływ mocy na końcu linii L2	
$P_{TRp} = P_A + P_B + P_C = 7,623 + 7,623 + 7,623 = 22,870 MW$ $Q_{TRp} = Q_A + Q_B + Q_C = 5,268 + 5,268 + 5,268 = 15,805 Mvar$		$P_{TRk} = P_A + P_B + P_C = 7,570 + 7,570 + 7,570 = 22,710 MW$ $Q_{TRk} = Q_A + Q_B + Q_C = 4,114 + 4,114 + 4,114 = 12,342 Mvar$	
Straty mocy czynnej		Straty mocy biernej	
$\Delta P_A = R_{TRA} \cdot \underline{I}_{TRA} ^2 = 0,610 \cdot 0,940^2 = 0,054 MW$		$\Delta Q_A = X_{TRA} \cdot \underline{I}_{TRA} ^2 = 1,3068 \cdot 0,940^2 = 1,154 Mvar$	
$\Delta P_B = R_{TRB} \cdot \underline{I}_{TRB} ^2 = 0,610 \cdot 0,940^2 = 0,054 MW$		$\Delta Q_B = X_{TRB} \cdot \underline{I}_{TRB} ^2 = 1,3068 \cdot 0,940^2 = 1,154 Mvar$	
$\Delta P_C = R_{TRC} \cdot \underline{I}_{TRC} ^2 = 0,610 \cdot 0,940^2 = 0,054 MW$		$\Delta Q_C = X_{TRC} \cdot \underline{I}_{TRC} ^2 = 1,3068 \cdot 0,940^2 = 1,154 Mvar$	
Suma strat mocy czynnej w transformatorze TR		Suma strat mocy biernej w linii T2	
$\Delta P_{TR} = \Delta P_A + \Delta P_B + \Delta P_C = 0,054 + 0,054 + 0,054 = 0,162 MW$		$\Delta Q_{TR} = \Delta Q_A + \Delta Q_B + \Delta Q_C = 1,154 + 1,154 + 1,154 = 3,462 Mvar$	

3.9.1. Obliczanie prądów i mocy w linii 110 kV (WN)

Tab. 3.18. Napięcia prądy i moce w linii WN

Napięcia fazowe na początku linii WN (SEM)		Napięcia fazowe na końcu linii WN	
$\underline{E}_A = (0,000 + j69,282)kV$		$\underline{U}_{TRGA} = (0,280 + j68,692)kV$	
$\underline{E}_B = (60,000 - j34,641)kV$		$\underline{U}_{TRGB} = (59,350 - j34,588)kV$	
$\underline{E}_C = (-60,000 - j34,641)kV$		$\underline{U}_{TRGC} = (-59,629 - j34,104)kV$	
Impedancje transformatora linii WN			
$\underline{Z}_{WNA} = (2,40 + j4,20)\Omega$		$\underline{Z}_{WNB} = (2,40 + j4,20)\Omega$	
		$\underline{Z}_{WNC} = (2,40 + j4,20)\Omega$	
Prądy w linii WN			
$\underline{I}_{WNA} = \frac{\underline{E}_A - \underline{U}_{TRGA}}{\underline{Z}_{WNA}} = \frac{(0,000 + j69,282) - (0,280 + j68,692)}{(2,40 + j4,20)} = (0,0771 + j0,1107)kA$		$ \underline{I}_{WNA} = 135A$	
$\underline{I}_{WNB} = \frac{\underline{E}_B - \underline{U}_{TRGB}}{\underline{Z}_{WNB}} = \frac{(60,000 - j34,641) - (59,350 - j34,588)}{(2,40 + j4,20)} = (0,0573 - j0,1221)kA$		$ \underline{I}_{WNB} = 135A$	
$\underline{I}_{WNC} = \frac{\underline{E}_C - \underline{U}_{TRGC}}{\underline{Z}_{WNC}} = \frac{(-60,000 - j34,641) - (-59,629 - j34,104)}{(2,40 + j4,20)} = (-0,1344 + j0,0115)kA$		$ \underline{I}_{WNC} = 135A$	
Moce w linii WN			
Moce na początku linii WN		Moce na końcu WN	
$\underline{S}_{WNAp.} = \underline{E}_A \cdot \underline{I}_{WNA}^* = (0,000 + j69,282) \cdot (0,0771 - j0,1107) = 7,667MW + j5,345Mvar$		$\underline{S}_{WNAk.} = \underline{U}_{TRGA} \cdot \underline{I}_{WNA}^* = (0,280 + j68,692) \cdot (0,0771 - j0,1107) = 7,623MW + j5,268Mvar$	
$\underline{S}_{WNBp.} = \underline{E}_B \cdot \underline{I}_{WNB}^* = (60,000 - j34,641) \cdot (0,0573 + j0,1221) = 7,667MW + j5,345Mvar$		$\underline{S}_{WNBk.} = \underline{U}_{TRGB} \cdot \underline{I}_{WNB}^* = (59,350 - j34,588) \cdot (0,0573 + j0,1221) = 7,623MW + j5,268Mvar$	
$\underline{S}_{WNCp.} = \underline{E}_C \cdot \underline{I}_{WNC}^* = (-60,000 - j34,641) \cdot (-0,1344 - j0,0115) = 7,667MW + j5,345Mvar$		$\underline{S}_{WNCk.} = \underline{U}_{TRGC} \cdot \underline{I}_{WNC}^* = (-59,629 - j34,104) \cdot (-0,1344 - j0,0115) = 7,623MW + j5,268Mvar$	
Całkowity przepływ mocy na początku linii L2		Całkowity przepływ mocy na końcu linii L2	
$\underline{P}_{L1p.} = P_A + P_B + P_C = 7,670 + 7,670 + 7,670 = 23,001 MW$ $\underline{Q}_{L1p.} = Q_A + Q_B + Q_C = 5,345 + 5,345 + 5,345 = 16,035 Mvar$		$\underline{P}_{Wnk.} = P_A + P_B + P_C = 7,623 + 7,623 + 7,623 = 22,869 MW$ $\underline{Q}_{Wnk.} = Q_A + Q_B + Q_C = 5,268 + 5,268 + 5,268 = 15,804 Mvar$	
Straty mocy czynnej		Straty mocy biernej	
$\Delta P_A = R_{L1A} \cdot \underline{I}_{L1A} ^2 = 2,40 \cdot 0,135^2 = 0,044 MW$		$\Delta Q_A = X_{WNA} \cdot \underline{I}_{WNA} ^2 = 4,20 \cdot 0,135^2 = 0,076 Mvar$	
$\Delta P_B = R_{L1B} \cdot \underline{I}_{L1B} ^2 = 2,40 \cdot 0,135^2 = 0,044 MW$		$\Delta Q_B = X_{WNB} \cdot \underline{I}_{WNB} ^2 = 4,20 \cdot 0,135^2 = 0,076 Mvar$	
$\Delta P_C = R_{L1C} \cdot \underline{I}_{L1C} ^2 = 2,40 \cdot 0,135^2 = 0,044 MW$		$\Delta Q_C = X_{WNC} \cdot \underline{I}_{WNC} ^2 = 4,20 \cdot 0,135^2 = 0,076 Mvar$	
Suma strat mocy czynnej w linii LWN		Suma strat mocy biernej w linii LWN	
$\Delta P_{L2} = \Delta P_A + \Delta P_B + \Delta P_C = 0,044 + 0,044 + 0,044 = 0,132 MW$		$\Delta Q_{L2} = \Delta Q_A + \Delta Q_B + \Delta Q_C = 0,076 + 0,076 + 0,076 = 0,228 Mvar$	

3.10. Podsumowanie

W celu sprawdzenia przedstawionej metody obliczeniowej należy porównać wyniki dla symetrycznego obciążenia sieci średniego napięcia otrzymane z programu PlansSN (służącego do obliczania rozptyłów w sieciach średnich napięć) oraz programu Plans (służącego głównie do obliczania rozptyłów w sieciach przesyłowych najwyższych napięć). Dla porównania istotne są napięcia międzyfazowe w głównych węzłach układu sieciowego.

Tab. 3.19. Porównanie wyników obliczeń

Węzeł	Z obliczeń	PlansSN	Plans
Ugórne TR	118,980 kV	118,9797 kV	119 (118,980) kV
Udolne TR	15,871 kV	15,871 kV	16 (15,871) kV
Ugórne T1	13,831 kV	13,8308 kV	14 (13,831) kV
Ugórne T2	13,515 kV	13,5142 kV	14 (13,514) kV
Straty mocy czynnej	2,0022MW	23,002-21,000=2,002 MW	2,00 MW
Straty mocy biernej	8,5347 Mvar	16,036-7,500=8,536 Mvar	8,54 Mvar

Jak widać wyniki są takie same, co pozwala stwierdzić, że opracowana metoda jest poprawna i można za jej pomocą wykonywać obliczenie dla stanów niesymetrycznego obciążenia, a także przy asymetrii parametrów impedancyjnych elementów sieci, a nawet przy asymetrii zasilania od strony sieci 110 kV.

4. Przykład obliczeń - stan niesymetrycznego obciążenia układu (asym)

4.1. Dane do obliczeń – impedancje elementów i napięcia początkowe (asym)

Parametry impedancyjne elementów sieci sprowadzone do poziomu sieci średniego napięcia zostały obliczone wcześniej i zestawione w (Tab. 4.1).

Tab. 4.1. Parametry impedancyjne sprowadzone do 15 kV

Oznaczenie	R	X
-	Ω	Ω
\underline{Z}_{wn}	0,0494	0,0865
\underline{Z}_{TR}	0,0610	1,3068
\underline{Z}_{L1}	0,6000	1,7000
\underline{Z}_{L2}	0,2400	0,6800

Podobnie jak poprzednio przyjęto, że napięcie zasilające sieć 110kV jest 120 kV i jest to napięcie międzyfazowe, stąd napięcie fazowe jest: $|E_f|=69,282$ kV. Przyjęto, że napięcie w fazie A jest w osi liczb urojonych. zatem wartości liczbowe napięć fazowych zasilających linię 110 kV są jak w (Tab. 4.2)

Tab. 4.2. Napięcia SEM 110kV fazowe

Napięcia fazowe		
	Układ biegunowy	Układ algebraiczny
\underline{E}_A	$69,282 \cdot e^{j90^\circ}$	$(0,000 + j69,282)kV$
\underline{E}_B	$69,282 \cdot e^{j330^\circ}$	$(60,000 - j34,641)kV$
\underline{E}_C	$69,282 \cdot e^{j210^\circ}$	$(-60,000 - j34,641)kV$

Napięcia te należy przetransformować na stronę dolną transformatora TR (110/SN) według zasady: zamiana napięć górnych na składowe symetryczne, transformacja składowych symetrycznych na stronę dolną przez przekładnię zwojową i godzinową, i na końcu zamiana składowych symetrycznych na fazowe. Wyniki są takie same jak dla obliczeń w stanach symetrycznych (poprzedni rozdział):

Tab. 4.3. Napięcia początkowe na stronach górnych transformatorów T1, T2

Napięcia fazowe		
	Układ algebraiczny	Układ biegunowy
$\underline{U}_{T1GA} = \underline{U}_{T2GA}$	$(-4,970 + j8,609)kV$	$9,940 \cdot e^{j120}$
$\underline{U}_{T1GB} = \underline{U}_{T2GB}$	$(9,940 - j0,000)kV$	$9,940 \cdot e^{j360}$
$\underline{U}_{T1GC} = \underline{U}_{T2GC}$	$(-4,970 - j8,609)kV$	$9,940 \cdot e^{j240}$

Następnie napięcia trzeba przetransformować na strony dolne transformatorów T1, T2 (według zasad opisanych wyżej). W wyniku otrzyma się:

Tab. 4.4. Napięcia początkowe na stronie dolnej transformatora T1

Napięcia fazowe		
	Układ algebraiczny	Układ biegunowy
\underline{U}_{T1DA}	$(-3,443 + j1,988)kV$	$3,976 \cdot e^{j150}$
\underline{U}_{T1DB}	$(3,443 + j1,988)kV$	$3,976 \cdot e^{j30}$
\underline{U}_{T1DC}	$(0,000 - j3,976)kV$	$3,976 \cdot e^{j270}$

Tab. 4.5. Napięcia początkowe na stronie dolnej T2

Napięcia fazowe		
	Układ algebraiczny	Układ biegunowy
\underline{U}_{T2DA}	$(0,230 - j0,133)kV$	$0,265 \cdot e^{j330}$
\underline{U}_{T2DB}	$(-0,230 - j0,133)kV$	$0,265 \cdot e^{j210}$
\underline{U}_{T2DC}	$(-0,000 + j0,265)kV$	$0,265 \cdot e^{j90}$

4.2. Dane do obliczeń – odbiory (asym)

Przyjęto obciążenia sumaryczne transformatorów T1, T2 o całkowitych mocach:

$$\underline{S}_{T1}=(12,0+j4,50) \text{ MVA} \quad \underline{S}_{T2}=(9,00+j3,00) \text{ MVA},$$

lecz w każdej fazie inne:

$\underline{S}_{T1A}=(6,00+j2,70) \text{ MVA}$	$\underline{S}_{T2A}=(3,00+j0,20) \text{ MVA}$
$\underline{S}_{T1B}=(2,50+j1,50) \text{ MVA}$	$\underline{S}_{T2B}=(4,50+j1,70) \text{ MVA}$
$\underline{S}_{T1C}=(3,50+j0,30) \text{ MVA}$	$\underline{S}_{T2C}=(1,50+j1,10) \text{ MVA}$

- prądy odbiorów podłączonych do transformatora T1 na poziomie nN:

$$I_{T1DA} = \frac{S_{T1A}^*}{U_{T1DA}^*} = \frac{6,00 - j2,70}{-3,443 - j1,988} = (-0,967 + j1,343) \text{ kA}$$

$$I_{T1DB} = \frac{S_{T1B}^*}{U_{T1DB}^*} = \frac{2,50 - j1,50}{3,443 - j1,988} = (0,733 - j0,012) \text{ kA}$$

$$I_{T1DC} = \frac{S_{T1C}^*}{U_{T1DC}^*} = \frac{3,50 - j0,30}{0,000 + j3,976} = (-0,075 - j0,880) \text{ kA}$$

- prądy odbiorów podłączonych do transformatora T2 na poziomie nN:

$$I_{T2DA} = \frac{S_{T2A}^*}{U_{T2A}^*} = \frac{3,00 - j0,20}{0,230 + j0,133} = (9,424 - j6,312) \text{ kA}$$

$$I_{T2DB} = \frac{S_{T2B}^*}{U_{T2B}^*} = \frac{4,50 - j1,70}{-0,230 + j0,133} = (-17,908 - j2,934) \text{ kA}$$

$$I_{T2DC} = \frac{S_{T2C}^*}{U_{T2C}^*} = \frac{1,50 - j1,10}{-0,000 - j0,265} = (4,150 + j5,659) \text{ kA}$$

Transformacja prądów T1, T2 na stronę górną:

- składowe symetryczne prądu transformatora **T1** na poziomie nN – wzór (1.9):

$$\begin{bmatrix} I_{T1D}^0 \\ I_{T1D}^1 \\ I_{T1D}^2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -0,967 + j1,343 \\ 0,733 - j0,012 \\ -0,075 - j0,880 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,103 + j0,150 \\ -0,683 + j0,830 \\ -0,182 + j0,363 \end{bmatrix} \text{ kA}$$

- składowe symetryczne prądu transformatora **T1** na poziomie SN – wzór (1.10):

$$\begin{bmatrix} I_{T1G}^0 \\ I_{T1G}^1 \\ I_{T1G}^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{I_{T1D}^1}{\vartheta_{GDT1}} \cdot e^{jh_{T1} \cdot 30^\circ} \\ \frac{I_{T1D}^2}{\vartheta_{GDT1}} \cdot e^{-jh_{T1} \cdot 30^\circ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{-0,683 + j0,830}{2,5} \cdot e^{j11 \cdot 30^\circ} \\ \frac{-0,182 + j0,363}{2,5} \cdot e^{-j11 \cdot 30^\circ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -0,071 + j0,424 \\ -0,135 + j0,089 \end{bmatrix} \text{ kA}$$

- składowe fazowe prądu transformatora **T1** na poziomie SN – wzór (1.11):

$$\begin{bmatrix} I_{T1GA} \\ I_{T1GB} \\ I_{T1GC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ I_{T1G}^1 \\ I_{T1G}^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ -0,071 + j0,424 \\ -0,135 + j0,089 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,206 + j0,513 \\ 0,393 - j0,313 \\ -0,187 - j0,200 \end{bmatrix} \text{ kA}$$

- składowe symetryczne prądu transformatora **T2** na poziomie nN – wzór (1.9):

$$\begin{bmatrix} I_{T2D}^0 \\ I_{T2D}^1 \\ I_{T2D}^2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 9,424 - j6,312 \\ -17,908 - j2,934 \\ 4,150 + j5,659 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1,445 - j1,196 \\ 7,915 - j8,926 \\ 2,954 + j3,809 \end{bmatrix} \text{ kA}$$

- składowe symetryczne prądu transformatora **T2** na poziomie SN – wzór (1.10):

$$\begin{bmatrix} I_{T2G}^0 \\ I_{T2G}^1 \\ I_{T2G}^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{I_{T2D}^1}{\vartheta_{GDT2}} \cdot e^{jh_{T2} \cdot 30^\circ} \\ \frac{I_{T2D}^2}{\vartheta_{GDT2}} \cdot e^{-jh_{T2} \cdot 30^\circ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{7,915 - j8,926}{37,5} \cdot e^{j5 \cdot 30^\circ} \\ \frac{2,954 + j3,809}{37,5} \cdot e^{-j5 \cdot 30^\circ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -0,064 + j0,312 \\ -0,017 - j0,127 \end{bmatrix} \text{ kA}$$

- składowe fazowe prądu transformatora **T2** na poziomie SN – wzór (1.11):

$$\begin{bmatrix} I_{T2GA} \\ I_{T2GB} \\ I_{T2GC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ I_{T2G}^1 \\ I_{T2G}^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ -0,064 + j0,312 \\ -0,017 - j0,127 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,081 + j0,184 \\ 0,421 - j0,052 \\ -0,340 - j0,132 \end{bmatrix} \text{ kA}$$

4.3. Obliczenia iteracyjne (asym)

Wektor spadków napięć obliczony na podstawie prądów odbiorów (po wymnożeniu prądów przez macierz Z) jest:

$$\begin{bmatrix} -1,003 - j0,323 \\ 0,598 + j1,092 \\ 0,405 - j0,769 \\ -2,361 - j0,392 \\ 1,706 + j2,256 \\ 0,655 - j1,864 \\ -2,506 - j0,403 \\ 1,182 + j2,530 \\ 0,663 - j2,126 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta \underline{U}_1^{(1)} \\ \Delta \underline{U}_2^{(1)} \\ \Delta \underline{U}_3^{(1)} \\ \Delta \underline{U}_4^{(1)} \\ \Delta \underline{U}_5^{(1)} \\ \Delta \underline{U}_6^{(1)} \\ \Delta \underline{U}_7^{(1)} \\ \Delta \underline{U}_8^{(1)} \\ \Delta \underline{U}_9^{(1)} \end{bmatrix} = [\underline{Z}] * \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \underline{I}_{T1GA} \\ \underline{I}_{T1GB} \\ \underline{I}_{T1GC} \\ \underline{I}_{T2GA} \\ \underline{I}_{T2GB} \\ \underline{I}_{T2GC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -0,206 + j0,513 \\ 0,393 - j0,313 \\ -0,187 - j0,200 \\ -0,081 + j0,184 \\ 0,421 - j0,052 \\ -0,340 - j0,132 \end{bmatrix} \text{ kA}$$

stąd nowe napięcia węzłowe w kroku pierwszym są:

$$\begin{aligned} \underline{U}_{TRDA}^{(1)} = \underline{U}_1 = \underline{E}'_A - \Delta \underline{U}_1^{(1)} &= (-4,970 + j8,609) - (-1,003 - j0,323) = (-3,968 + j8,931) \\ \underline{U}_{TRDB}^{(1)} = \underline{U}_2 = \underline{E}'_B - \Delta \underline{U}_2^{(1)} &= (9,940 - j0,000) - (0,598 + j1,092) = (9,343 - j1,092) \\ \underline{U}_{TRDC}^{(1)} = \underline{U}_3 = \underline{E}'_C - \Delta \underline{U}_3^{(1)} &= (-4,970 - j8,609) - (0,405 - j0,769) = (-5,375 - j7,839) \\ \underline{U}_{T1GA}^{(1)} = \underline{U}_4 = \underline{E}'_A - \Delta \underline{U}_4^{(1)} &= (-4,970 + j8,609) - (-2,361 - j0,392) = (-2,609 + j9,001) \\ \underline{U}_{T1GB}^{(1)} = \underline{U}_5 = \underline{E}'_B - \Delta \underline{U}_5^{(1)} &= (9,940 - j0,000) - (1,706 + j2,256) = (8,234 - j2,256) \\ \underline{U}_{T1GC}^{(1)} = \underline{U}_6 = \underline{E}'_C - \Delta \underline{U}_6^{(1)} &= (-4,970 - j8,609) - (0,655 - j1,864) = (-5,625 - j6,745) \\ \underline{U}_{T2GA}^{(1)} = \underline{U}_7 = \underline{E}'_A - \Delta \underline{U}_7^{(1)} &= (-4,970 + j8,609) - (-2,506 - j0,403) = (-2,464 + j9,012) \\ \underline{U}_{T2GB}^{(1)} = \underline{U}_8 = \underline{E}'_B - \Delta \underline{U}_8^{(1)} &= (9,940 - j0,000) - (1,182 + j2,530) = (8,098 - j2,530) \\ \underline{U}_{T2GC}^{(1)} = \underline{U}_9 = \underline{E}'_C - \Delta \underline{U}_9^{(1)} &= (-4,970 - j8,609) - (0,663 - j2,126) = (-5,634 - j6,482) \end{aligned}$$

Największa zmiana napięcia jest dla \underline{U}_{T2GB} i wynosi $\text{Maks } dU = |9,940 - 8,098| + |0,000 - (-2,530)| = 4,372$ – jest to wskaźnik, który powinien dążyć do zera w przypadku zbieżnego procesu iteracyjnego.

4.4. Obliczenie napięć transformatorów T1,T2, po pierwszej iteracji (asym)

Należy najpierw obliczone napięcia na stronach górnych transformatorów T1,T2 , przetransformować na strony dolne (niskiego napięcia). Należy najpierw obliczyć składowe symetryczne napięcie strony górnej, przetransformować je na stronę dolną, a następnie przeliczyć na składowe fazowe.

- Obliczenia dla transformatora T1:

Składowe symetryczne T1 (G):

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_{T1G} \\ \underline{U}_{T1G} \\ \underline{U}_{T1G} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{U}_{T1GA} \\ \underline{U}_{T1GB} \\ \underline{U}_{T1GC} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -2,609 + j9,001 \\ 8,234 - j2,256 \\ -5,625 - j6,745 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,000 - j0,000 \\ -2,600 + j8,501 \\ 0,009 + j0,500 \end{bmatrix} kV$$

Transformacja składowych symetrycznych na dolną stronę transformatora T1:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_{T1D} \\ \underline{U}_{T1D} \\ \underline{U}_{T1D} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\underline{U}_{T1G}}{\vartheta_{GDT1}} \\ \frac{\underline{U}_{T1G}}{\vartheta_{GDT1}} \cdot e^{-jh_{T1} \cdot 30^\circ} \\ \frac{\underline{U}_{T1G}}{\vartheta_{GDT1}} \cdot e^{jh_{T1} \cdot 30^\circ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -0,000 - j0,000 \\ \frac{-2,600 + j8,501}{2,5} \cdot e^{-j11 \cdot 30^\circ} \\ \frac{0,009 + j0,500}{2,5} \cdot e^{+j11 \cdot 30^\circ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,000 - j0,000 \\ 2,601 - j2,425 \\ -0,097 - j0,175 \end{bmatrix} kV$$

Składowe fazowe napięć transformatora T1 na poziomie nN (po pierwszej iteracji):

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_{T1DA}^{(1)} \\ \underline{U}_{T1DB}^{(1)} \\ \underline{U}_{T1DC}^{(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{U}_{T1D} \\ \underline{U}_{T1D} \\ \underline{U}_{T1D} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -0,000 - j0,000 \\ 2,601 - j2,425 \\ -0,097 - j0,175 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2,504 + j2,600 \\ 3,201 + j1,037 \\ -0,696 - j3,636 \end{bmatrix} kV$$

- Obliczenia dla transformatora T2:

Składowe symetryczne T2 (G):

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_{T2G} \\ \underline{U}_{T2G} \\ \underline{U}_{T2G} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{U}_{T2GA} \\ \underline{U}_{T2GB} \\ \underline{U}_{T2GC} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -2,464 + j9,012 \\ 8,098 - j2,530 \\ -5,634 - j6,482 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,000 - j0,000 \\ -2,373 + j8,470 \\ -0,091 + j0,542 \end{bmatrix} kV$$

Transformacja składowych symetrycznych na dolną stronę transformatora T2:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_{T2D} \\ \underline{U}_{T2D} \\ \underline{U}_{T2D} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\underline{U}_{T2G}}{\vartheta_{GDT2}} \\ \frac{\underline{U}_{T2G}}{\vartheta_{GDT2}} \cdot e^{-jh_{T2} \cdot 30^\circ} \\ \frac{\underline{U}_{T2G}}{\vartheta_{GDT2}} \cdot e^{jh_{T2} \cdot 30^\circ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -0,000 - j0,000 \\ \frac{-2,373 + j8,470}{37,5} \cdot e^{-j5 \cdot 30^\circ} \\ \frac{0,001 + j0,542}{37,5} \cdot e^{+j5 \cdot 30^\circ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,000 - j0,000 \\ 0,168 - j0,164 \\ -0,005 - j0,014 \end{bmatrix} kV$$

Składowe fazowe napięć transformatora T2 na poziomie nN (po pierwszej iteracji):

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_{T2DA}^{(1)} \\ \underline{U}_{T2DB}^{(1)} \\ \underline{U}_{T2DC}^{(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{U}_{T2D} \\ \underline{U}_{T2D} \\ \underline{U}_{T2D} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -0,000 - j0,000 \\ 0,168 - j0,164 \\ -0,005 - j0,014 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,163 - j0,178 \\ -0,211 - j0,061 \\ 0,049 + j0,239 \end{bmatrix} kV$$

Jak widać występuje tu tylko składowe zgodne i przeciwne transformowane na strony dolne transformatorów T1,T2.

4.5. Korekcja prądów odbiorów po iteracji 1 (asym)

Po pierwszej iteracji otrzymano nowe napięcia na transformatorach T1, T2, tak więc dla zadanych mocy odbiorów należy obliczyć nowe prądy:

- prądy odbiorów podłączonych do transformatora T1 na poziomie nN:

$$I_{T1DA} = \frac{S_{T1A}^*}{U_{T1DA}^*} = \frac{6,00 - j2,70}{-2,504 - j2,600} = (-0,614 + j1,716)kA$$

$$I_{T1DB} = \frac{S_{T1B}^*}{U_{T1DB}^*} = \frac{2,50 - j1,50}{3,201 - j1,037} = (0,844 - j0,195)kA$$

$$I_{T1DC} = \frac{S_{T1C}^*}{U_{T1DC}^*} = \frac{3,50 - j1,50}{-0,696 + j3,636} = (-0,257 - j0,913)kA$$

- prądy odbiorów podłączonych do transformatora T2 na poziomie nN:

$$I_{T2DA} = \frac{S_{T2A}^*}{U_{T2A}^*} = \frac{3,00 - j0,20}{0,163 + j0,061} = (7,796 - j9,748)kA$$

$$I_{T1DB} = \frac{S_{T1B}^*}{U_{T1B}^*} = \frac{3,00 - j1,00}{-0,211 + j0,061} = (-21,794 + j1,768)kA$$

$$I_{T1DC} = \frac{S_{T1C}^*}{U_{T1C}^*} = \frac{3,00 - j1,30}{0,049 - j0,239} = (5,661 + j5,130)kA$$

Transformacja prądów T1,T2 na stronę górną:

- składowe symetryczne prądu transformatora **T1** na poziomie nN – wzór (1.9):

$$\begin{bmatrix} I_{0T1D} \\ I_{1T1D} \\ I_{2T1D} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0,614 - j1,716 \\ -0,844 + j0,195 \\ 0,257 + j0,913 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,009 - j0,203 \\ 0,510 - j1,075 \\ 0,095 - j0,439 \end{bmatrix} kA$$

- składowe symetryczne prądu transformatora **T1** na poziomie SN – wzór (1.10):

$$\begin{bmatrix} I_{0T1G} \\ I_{1T1G} \\ I_{2T1G} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{I_{1T1D}}{\vartheta_{GDT1}} \cdot e^{jh_{T1} \cdot 30^\circ} \\ \frac{I_{2T1D}}{\vartheta_{GDT1}} \cdot e^{-jh_{T1} \cdot 30^\circ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{0,510 - j1,075}{2,5} \cdot e^{j11 \cdot 30^\circ} \\ \frac{0,095 - j0,439}{2,5} \cdot e^{-j11 \cdot 30^\circ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0,038 + j0,474 \\ -0,121 + j0,133 \end{bmatrix} kA$$

- składowe fazowe prądu transformatora **T1** na poziomie SN – wzór (1.11):

$$\begin{bmatrix} I_{T1GA} \\ I_{T1GB} \\ I_{T1GC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ I_{1T1G} \\ I_{2T1G} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0,038 + j0,474 \\ -0,121 + j0,133 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,082 + j0,607 \\ 0,337 - j0,441 \\ -0,254 - j0,166 \end{bmatrix} kA$$

- składowe symetryczne prądu transformatora **T2** na poziomie nN – wzór (1.9):

$$\begin{bmatrix} I_{0T2D} \\ I_{1T2D} \\ I_{2T2D} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 7,796 - j9,748 \\ -21,794 + j1,768 \\ 5,661 + j5,130 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2,779 - j0,950 \\ 6,258 - j12,325 \\ 4,317 + j3,526 \end{bmatrix} kA$$

- składowe symetryczne prądu transformatora **T2** na poziomie SN – wzór (1.10):

$$\begin{bmatrix} I_{0T2G} \\ I_{1T2G} \\ I_{2T2G} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{I_{1T2D}}{\vartheta_{GDT2}} \cdot e^{jh_{T2} \cdot 30^\circ} \\ \frac{I_{2T2D}}{\vartheta_{GDT2}} \cdot e^{-jh_{T2} \cdot 30^\circ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{6,258 - j12,325}{37,5} \cdot e^{j5 \cdot 30^\circ} \\ \frac{4,317 + j3,526}{37,5} \cdot e^{-j5 \cdot 30^\circ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0,020 + j0,368 \\ -0,053 - j0,139 \end{bmatrix} kA$$

- składowe fazowe prądu transformatora **T2** na poziomie SN – wzór (1.11):

$$\begin{bmatrix} I_{T2GA} \\ I_{T2GB} \\ I_{T2GC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ I_{1T2G} \\ I_{2T2G} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0,020 + j0,368 \\ -0,053 - j0,139 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,033 + j0,229 \\ 0,456 - j0,177 \\ -0,423 - j0,052 \end{bmatrix} kA$$

4.6. Nowe napięcia i prądy węzłowe po iteracjach (asym)

Wektor prądów węzłowych (I.12), na podstawie którego będą obliczone wartości strat napięć sieciowych na podstawie macierzy admitancyjne (impedancyjnej) węzłowej po pierwszej iteracji jest:

$$\begin{bmatrix} -1,177 - j0,068 \\ 0,949 + j1,035 \\ 0,228 - j0,966 \\ -2,668 + j0,237 \\ 2,476 + j2,011 \\ 0,192 - j2,248 \\ -2,831 - j0,270 \\ 2,706 + j2,278 \\ 0,125 - j2,548 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{\Delta U}_1^{(1)} \\ \underline{\Delta U}_2^{(1)} \\ \underline{\Delta U}_2^{(1)} \\ \underline{\Delta U}_4^{(1)} \\ \underline{\Delta U}_5^{(1)} \\ \underline{\Delta U}_6^{(1)} \\ \underline{\Delta U}_7^{(1)} \\ \underline{\Delta U}_7^{(1)} \\ \underline{\Delta U}_8^{(1)} \\ \underline{\Delta U}_9^{(1)} \end{bmatrix} = [Z] * \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \underline{I}_{T1GA} \\ \underline{I}_{T1GB} \\ \underline{I}_{T1GC} \\ \underline{I}_{T2GA} \\ \underline{I}_{T2GB} \\ \underline{I}_{T2GC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -0,082 + j0,607 \\ 0,337 - j0,441 \\ -0,254 - j0,166 \\ -0,033 + j0,229 \\ 0,456 - j0,177 \\ -0,423 - j0,052 \end{bmatrix} kA$$

Należy teraz kontynuować proces iteracyjny:

- o obliczyć napięcia węzłowe na poziomie sieci SN,
- o przenieść te napięcia na strony dolne transformatorów T1,T2,
- o obliczyć prądy odbiorów na poziomie napięć dolnych transformatorów T1,T2
- o przetransformować te prądy na napięcie górne (SN) transformatorów T1,T2
- o ponownie obliczyć straty napięć z iloczynu macierzy impedancyjnej itd.

W kolejnych krokach maksymalne zmiany napięć są:

itr= 1	Maks dU	4.3722	>	0.001
itr= 2	Maks dU	1.1150	>	0.001
itr= 3	Maks dU	0.4584	>	0.001
itr= 4	Maks dU	0.1625	>	0.001
.
itr= 9	Maks dU	0.0026	>	0.001
itr=10	Maks dU	0.0010	>	0.001

Po zakończeniu iteracji prądy węzłowe i straty napięć są:

$$\begin{bmatrix} -1,336 - j0,023 \\ 1,112 + j1,140 \\ 0,224 - j1,117 \\ -3,011 + j0,392 \\ 2,878 + j2,193 \\ 0,133 - j2,585 \\ -3,197 + j0,438 \\ 3,151 + j2,492 \\ 0,047 - j2,930 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{\Delta U}_1^{(10)} \\ \underline{\Delta U}_2^{(10)} \\ \underline{\Delta U}_2^{(10)} \\ \underline{\Delta U}_4^{(10)} \\ \underline{\Delta U}_5^{(10)} \\ \underline{\Delta U}_6^{(10)} \\ \underline{\Delta U}_7^{(10)} \\ \underline{\Delta U}_7^{(10)} \\ \underline{\Delta U}_8^{(10)} \\ \underline{\Delta U}_9^{(10)} \end{bmatrix} = [Z] * \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \underline{I}_{T1GA} \\ \underline{I}_{T1GB} \\ \underline{I}_{T1GC} \\ \underline{I}_{T2GA} \\ \underline{I}_{T2GB} \\ \underline{I}_{T2GC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -0,0653 + j0,6874 \\ 0,3594 - j0,5108 \\ -0,2941 - j0,1766 \\ -0,0266 + j0,2652 \\ 0,5174 - j0,2185 \\ -0,4908 - j0,0467 \end{bmatrix} kA$$

Nowe napięcia węzłowe wynikowe po iteracjach są:

$$\begin{aligned} \underline{U}_{TRDA}^{(1)} &= \underline{U}_1 = \underline{E}'_A - \underline{\Delta U}_1^{(1)} = (-4,970 + j8,609) - (-1,336 - j0,023) = (-3,634 + j8,632) \\ \underline{U}_{TRDB}^{(1)} &= \underline{U}_2 = \underline{E}'_B - \underline{\Delta U}_2^{(1)} = (9,940 - j0,000) - (1,112 + j1,140) = (8,829 - j1,140) \\ \underline{U}_{TRDC}^{(1)} &= \underline{U}_3 = \underline{E}'_C - \underline{\Delta U}_3^{(1)} = (-4,970 - j8,609) - (0,224 - j1,117) = (-5,194 - j7,492) \\ \underline{U}_{T1GA}^{(1)} &= \underline{U}_4 = \underline{E}'_A - \underline{\Delta U}_4^{(1)} = (-4,970 + j8,609) - (-3,011 + j0,392) = (-1,960 + j8,216) \\ \underline{U}_{T1GB}^{(1)} &= \underline{U}_5 = \underline{E}'_B - \underline{\Delta U}_5^{(1)} = (9,940 - j0,000) - (2,878 + j2,193) = (7,063 - j2,193) \\ \underline{U}_{T1GC}^{(1)} &= \underline{U}_6 = \underline{E}'_C - \underline{\Delta U}_6^{(1)} = (-4,970 - j8,609) - (0,133 - j2,585) = (-5,103 - j6,023) \\ \underline{U}_{T2GA}^{(1)} &= \underline{U}_7 = \underline{E}'_A - \underline{\Delta U}_7^{(1)} = (-4,970 + j8,609) - (-3,197 + j0,438) = (-1,773 + j8,171) \\ \underline{U}_{T2GB}^{(1)} &= \underline{U}_8 = \underline{E}'_B - \underline{\Delta U}_8^{(1)} = (9,940 - j0,000) - (3,151 + j2,492) = (6,790 - j2,492) \\ \underline{U}_{T2GC}^{(1)} &= \underline{U}_9 = \underline{E}'_C - \underline{\Delta U}_9^{(1)} = (-4,970 - j8,609) - (0,047 - j2,930) = (-5,017 - j5,678) \end{aligned}$$

4.7. Obliczanie napięć wynikowych w układzie przesyłowym (asym)

4.7.1. Obliczenia dla transformatora T2

Tab. 4.6. Napięcia na stronie górnej transformatora T2

Napięcia fazowe	Napięcia międzyfazowe
$\underline{U}_{T2GA} = (-1,773 + j8,171)kV = 8,361e^{j102,2^\circ}$	$\underline{U}_{T2GBA} = (-8,563 + j10,663)kV = 13,675e^{j126,8^\circ}$
$\underline{U}_{T2GB} = (6,790 - j2,492)kV = 7,233e^{j339,8^\circ}$	$\underline{U}_{T2GAC} = (-3,244 - j13,849)kV = 14,224e^{j256,8^\circ}$
$\underline{U}_{T2GC} = (-5,017 - j5,678)kV = 7,577e^{j228,5^\circ}$	$\underline{U}_{T2GCB} = (11,807 + j3,186)kV = 12,229e^{j15,1^\circ}$

Przeliczenie napięć strony górnej transformatora T2 na stronę dolną:

Składowe symetryczne T2:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_{T2G} \\ \underline{U}_{1T2G} \\ \underline{U}_{2T2G} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{U}_{T2GA} \\ \underline{U}_{T2GB} \\ \underline{U}_{T2GC} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -1,773 + j8,171 \\ 6,790 - j2,492 \\ -5,017 - j5,678 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,000 - j0,000 \\ -1,806 + j7,494 \\ 0,033 + j0,677 \end{bmatrix} kV$$

Transformacja składowych symetrycznych na dolną stronę transformatora T2:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_{T2D} \\ \underline{U}_{1T2D} \\ \underline{U}_{2T2D} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\underline{U}_{T2G}}{\vartheta_{GDT2}} \\ \frac{\underline{U}_{1T2G}}{\vartheta_{GDT2}} \cdot e^{-jh_{T2} \cdot 30^\circ} \\ \frac{\underline{U}_{2T2G}}{\vartheta_{GDT2}} \cdot e^{jh_{T2} \cdot 30^\circ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -0,000 - j0,000 \\ -1,806 + j7,494 \\ 0,033 + j0,677 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,000 - j0,000 \\ 0,142 - j0,149 \\ -0,010 - j0,015 \end{bmatrix} kV$$

Składowe fazowe napięć transformatora T2 na poziomie nN:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_{T2DA} \\ \underline{U}_{T2DB} \\ \underline{U}_{T2DC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{U}_{T2D} \\ \underline{U}_{1T2D} \\ \underline{U}_{2T2D} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -0,000 - j0,000 \\ 0,142 - j0,149 \\ -0,010 - j0,015 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,132 - j0,164 \\ -0,182 - j0,049 \\ 0,050 + j0,213 \end{bmatrix} kV$$

Tab. 4.7. Napięcia na stronie dolnej transformatora T2

Napięcia fazowe	Napięcia międzyfazowe
$\underline{U}_{T2DA} = (0,132 - j0,164)kV = 0,211e^{j308,8^\circ}$	$\underline{U}_{T2DBA} = (0,314 - j0,115)kV = 0,334e^{j339,8^\circ}$
$\underline{U}_{T2DB} = (-0,182 - j0,049)kV = 0,188e^{j195,1^\circ}$	$\underline{U}_{T2DAC} = (-0,082 + j0,377)kV = 0,386e^{j102,2^\circ}$
$\underline{U}_{T2DC} = (0,050 + j0,213)kV = 0,219e^{j76,8^\circ}$	$\underline{U}_{T2DCB} = (-0,232 - j0,262)kV = 0,350e^{j228,5^\circ}$

Tab. 4.8. Prądy w transformatorze T2

Strona górna (z wyników po iteracjach)	Strona dolna (z obliczeń mocy i napięć strony dolnej)
$\underline{I}_{T2GA} = (-0,0266 + j0,2652)kA \quad \underline{I}_{T2GA} = 267A$	$\underline{I}_{T2DA} = \frac{S_{T2A}^*}{U_{T2DA}^*} = \frac{3,00 - j0,20}{0,132 + j0,164} = (8,180 - j11,703)kA \quad \underline{I}_{T2DA} = 14279A$
$\underline{I}_{T2GB} = (0,5174 - j0,2185)kA \quad \underline{I}_{T2GB} = 562A$	$\underline{I}_{T2DB} = \frac{S_{T2B}^*}{U_{T2DB}^*} = \frac{4,50 - j1,70}{-0,182 + j0,049} = (-25,425 + j2,490)kA \quad \underline{I}_{T2DB} = 25546A$
$\underline{I}_{T2GC} = (-0,4908 - j0,0467)kA \quad \underline{I}_{T2GC} = 493A$	$\underline{I}_{T2DC} = \frac{S_{T2C}^*}{U_{T2DC}^*} = \frac{1,50 - j1,10}{0,050 - j0,213} = (6,452 + j3,965)kA \quad \underline{I}_{T2DC} = 8493A$

Tab. 4.9. Moce w transformatorze T2

Strona górna	Strona dolna (z danych)
$\underline{S}_{T2GA} = U_{T2GA} \cdot \underline{I}_{T2GA}^* = (-1,773 + j8,171) \cdot (-0,0266 - j0,2652) = 2,214MW + j0,253Mvar$	$\underline{S}_{T2DA} = 3,00MW + j0,20Mvar$
$\underline{S}_{T2GB} = U_{T2GA} \cdot \underline{I}_{T2GB}^* = (6,790 - j2,492) \cdot (0,5174 + j0,2185) = 4,058MW + j0,194Mvar$	$\underline{S}_{T2DB} = 4,50MW + j1,70Mvar$
$\underline{S}_{T2GC} = U_{T2GC} \cdot \underline{I}_{T2GC}^* = (-5,017 - j5,678) \cdot (-0,4908 + j0,0467) = 2,728MW + j2,553Mvar$	$\underline{S}_{T2DC} = 1,50MW + j1,10Mvar$
$\underline{S}_{T2G} = (2,214 - j0,253) + (4,058 + j0,194) + (2,728 + j2,553) = 9,000MW + j3,000Mvar$	$\underline{S}_{T2D} = 9,00MW + j3,00Mvar$

4.7.2. Obliczenia dla transformatora T1 (asym)

Tab. 4.10. Napięcia na stronie górnej transformatora T1

Napięcia fazowe	Napięcia międzyfazowe
$\underline{U}_{T1GA} = (-1,960 + j8,216)kV = 8,447e^{j103,4^\circ}$	$\underline{U}_{T1GBA} = (-9,022 + j10,409)kV = 13,775e^{j130,9^\circ}$
$\underline{U}_{T1GB} = (7,063 - j2,193)kV = 7,395e^{j342,8^\circ}$	$\underline{U}_{T1GAC} = (-3,144 - j14,240)kV = 14,583e^{j257,6^\circ}$
$\underline{U}_{T1GC} = (-5,103 - j6,023)kV = 7,894e^{j229,7^\circ}$	$\underline{U}_{T1GCB} = (12,166 + j3,831)kV = 12,755e^{j17,5^\circ}$

Przeliczenie napięć strony górnej transformatora T1 na stronę dolną:

Składowe symetryczne T2:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_{T1G} \\ \underline{U}_{T1G} \\ \underline{U}_{T1G} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{U}_{T1GA} \\ \underline{U}_{T1GB} \\ \underline{U}_{T1GC} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -1,960 + j8,216 \\ 7,063 - j2,193 \\ -5,103 - j6,023 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,000 - j0,000 \\ -2,086 + j7,620 \\ 0,126 + j0,596 \end{bmatrix} kV$$

Transformacja składowych symetrycznych na dolną stronę transformatora T1:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_{T1D} \\ \underline{U}_{T1D} \\ \underline{U}_{T1D} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\underline{U}_{T1G}}{\vartheta_{GDT1}} \\ \frac{\underline{U}_{T1G}}{\vartheta_{GDT1}} \cdot e^{-jh_{T1} \cdot 30^\circ} \\ \frac{\underline{U}_{T1G}}{\vartheta_{GDT1}} \cdot e^{jh_{T1} \cdot 30^\circ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -0,000 - j0,000 \\ -2,086 + j7,620 \\ 0,126 + j0,596 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 2,5 & e^{-j11 \cdot 30^\circ} \\ 2,5 & e^{+j11 \cdot 30^\circ} & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,000 - j0,000 \\ -2,246 + j2,223 \\ 0,163 + j0,181 \end{bmatrix} kV$$

Składowe fazowe napięć transformatora T1 na poziomie nN:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_{T1DA} \\ \underline{U}_{T1DB} \\ \underline{U}_{T1DC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{U}_{T1D} \\ \underline{U}_{T1D} \\ \underline{U}_{T1D} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -0,000 - j0,000 \\ -2,246 + j2,223 \\ 0,163 + j0,181 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2,084 + j2,404 \\ 2,810 + j0,885 \\ -0,726 - j3,289 \end{bmatrix} kV$$

Tab. 4.11. Napięcia na stronie dolnej transformatora T1

Napięcia fazowe	Napięcia międzyfazowe
$\underline{U}_{T1DA} = (-2,084 + j2,404)kV = 3,181e^{j130,9^\circ}$	$\underline{U}_{T1DBA} = (-4,893 + j1,519)kV = 5,124e^{j162,8^\circ}$
$\underline{U}_{T1DB} = (2,810 + j0,885)kV = 2,946e^{j17,5^\circ}$	$\underline{U}_{T1DAC} = (1,358 - j5,692)kV = 5,852e^{j283,4^\circ}$
$\underline{U}_{T1DC} = (-0,726 - j3,289)kV = 3,368e^{j257,6^\circ}$	$\underline{U}_{T1DCB} = (3,536 + j4,173)kV = 5,469e^{j49,7^\circ}$

Tab. 4.12. Prądy w transformatorze T1

Strona górna	Strona dolna
$\underline{I}_{T1GA} = (-0,0653 + j0,6874)kA \quad \underline{I}_{T1GA} = 691A$	$\underline{I}_{T1DA} = \frac{S_{T1A}^*}{U_{T1DA}} = \frac{6,00 - j2,70}{-2,084 - j2,404} = (-0,594 + j1,981)kA \quad \underline{I}_{T1DA} = 2068A$
$\underline{I}_{T1GB} = (0,3594 - j0,5108)kA \quad \underline{I}_{T1GB} = 625A$	$\underline{I}_{T1DB} = \frac{S_{T1B}^*}{U_{T1DB}} = \frac{2,50 - j1,50}{2,810 - j0,885} = (0,962 - j0,231)kA \quad \underline{I}_{T1DB} = 990A$
$\underline{I}_{T1GC} = (-0,2941 - j0,1766)kA \quad \underline{I}_{T1GC} = 343A$	$\underline{I}_{T1DC} = \frac{S_{T1C}^*}{U_{T1DC}} = \frac{3,50 - j0,30}{-0,726 + j3,368} = (-0,311 - j0,996)kA \quad \underline{I}_{T1DC} = 1043A$

Tab. 4.13. Moce w transformatorze T1

Strona górna	Strona dolna (z danych)
$\underline{S}_{T1GA} = U_{T1GA} \cdot I_{T1GA}^* = (-1,960 + j8,216) \cdot (-0,0653 - j0,6874) = 5,776MW + j0,810Mvar$	$\underline{S}_{T1DA} = 6,00MW + j2,70Mvar$
$\underline{S}_{T1GB} = U_{T1GB} \cdot I_{T1GB}^* = (7,063 - j2,193) \cdot (0,3594 + j0,5108) = 3,659MW + j2,819Mvar$	$\underline{S}_{T1DB} = 2,50MW + j1,50Mvar$
$\underline{S}_{T1GC} = U_{T1GC} \cdot I_{T1GC}^* = (-5,103 - j6,023) \cdot (-0,2941 + j0,1766) = 2,565MW + j0,871Mvar$	$\underline{S}_{T1DC} = 3,50MW + j0,30Mvar$
$\underline{S}_{T1G} = (5,776 + j0,810) + (3,659 + j2,819) + (2,565 + j0,871) = 12,00MW + j4,50Mvar$	$\underline{S}_{T1D} = 12,00MW + j4,50Mvar$

4.7.3. Obliczenia dla transformatora TR (asym)

Tab. 4.14. Napięcia na stronie dolnej transformatora TR

Napięcia fazowe	Napięcia międzyfazowe
$\underline{U}_{TRDA} = (-3,634 + j8,632)kV = 9,365e^{j112,8^\circ}$	$\underline{U}_{TRDBA} = (-12,463 + j9,771)kV = 15,837e^{j141,9^\circ}$
$\underline{U}_{TRDB} = (8,829 - j1,140)kV = 8,902e^{j352,6^\circ}$	$\underline{U}_{TRDAC} = (-1,560 - j16,123)kV = 16,198e^{j264,5^\circ}$
$\underline{U}_{TRGC} = (-5,194 - j7,492)kV = 9,116e^{j225,3^\circ}$	$\underline{U}_{TRDCB} = (14,023 + j6,352)kV = 15,394e^{j24,2^\circ}$

Brakuje jeszcze napięć na zaciskach górnych transformatora TR odniesionych do napięcia średniego, oraz napięć po stronie 110 kV. Należy więc najpierw obliczyć napięcia za impedancjami transformatora, a następnie te napięcia przetransformować na stronę górną transformatora TR, przez przekładnie zwojową i godzinową. Przez transformator TR po stronie SN płynie suma prądów odbiorów T1 i T2 po stronie SN.

- prądy płynące przez transformator TR po stronie dolnej (SN):

$$\underline{I}_{TRDA} = \underline{I}_{T1GA} + \underline{I}_{T2GA} = (-0,0653 + j0,6874) + (-0,0266 + j0,2652) = (-0,092 + j0,953)kA$$

$$\underline{I}_{TRDB} = \underline{I}_{T1GB} + \underline{I}_{T2GB} = (0,3594 - j0,5108) + (0,5174 - j0,2185) = (0,877 - j0,729)kA$$

$$\underline{I}_{TRDC} = \underline{I}_{T1GC} + \underline{I}_{T2GC} = (-0,2941 - j0,1766) + (-0,4908 - j0,0467) = (-0,785 - j0,223)kA$$

- napięcia za impedancją transformatora TR:

$$\underline{U}'_{TRGA} = \underline{U}_{TRDA} + \underline{Z}_{T1GA} \cdot \underline{I}_{TRDA} = (-3,737 + j8,835) + (0,610 + j1,3068) \cdot (-0,092 + j0,953) = (-4,883 + j8,570)kV$$

$$\underline{U}'_{TRGB} = \underline{U}_{TRDB} + \underline{Z}_{T1GB} \cdot \underline{I}_{TRDB} = (8,389 - j0,935) + (0,610 + j1,3068) \cdot (0,877 - j0,729) = (9,834 - j0,040)kV$$

$$\underline{U}'_{TRGC} = \underline{U}_{TRDC} + \underline{Z}_{T1GC} \cdot \underline{I}_{TRDC} = (-5,387 - j7,376) + (0,610 + j1,3068) \cdot (-0,785 - j0,223) = (-4,951 - j8,530)kV$$

- składowe symetryczne napięć strony górnej transformatora TR odniesione do SN:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}'_{0TRG} \\ \underline{U}'_{1TRG} \\ \underline{U}'_{2TRG} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{U}'_{TRGA} \\ \underline{U}'_{TRGB} \\ \underline{U}'_{TRGC} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -4,883 + j8,570 \\ 9,834 - j0,040 \\ -4,951 - j8,530 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,000 - j0,000 \\ -4,893 + j8,553 \\ 0,009 + j0,133 \end{bmatrix} kV$$

- transformacja składowych symetrycznych na górną stronę (110 kV) transformatora TR:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_{0TRG} \\ \underline{U}_{1TRG} \\ \underline{U}_{2TRG} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{U}'_{0TRG} \cdot \vartheta_{GDTR} \\ \underline{U}'_{1TRG} \cdot \vartheta_{GDTR} e^{j\theta_{TR}30^\circ} \\ \underline{U}'_{2TRG} \cdot \vartheta_{GDTR} e^{-j\theta_{TR}30^\circ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,000 - j0,000 \\ (-4,893 + j8,553) \cdot 6,9697e^{j11^\circ30'} \\ (0,009 + j0,133) \cdot 6,9697e^{-j11^\circ30'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,000 - j0,000 \\ 0,274 + j68,674 \\ 0,003 + j0,113 \end{bmatrix} kV$$

- zamiana składowych symetrycznych na fazowe napięć TR na poziomie 110kV

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_{TRGA} \\ \underline{U}_{TRGB} \\ \underline{U}_{TRGC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{U}_{0TRG} \\ \underline{U}_{1TRG} \\ \underline{U}_{2TRG} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -0,073 + j0,130 \\ 0,264 + j68,639 \\ 0,042 + j0,180 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,271 + j68,807 \\ 59,222 - j34,644 \\ -59,494 - j34,163 \end{bmatrix} kV$$

Tab. 4.15. Napięcia na stronie górnej transformatora TR

Napięcia fazowe	Napięcia międzyfazowe
$\underline{U}_{TRGA} = (0,271 + j68,807)kV = 68,808e^{j89,8^\circ}$	$\underline{U}_{TRGBA} = (-58,951 + j103,451)kV = 119,068e^{j119,7^\circ}$
$\underline{U}_{TRGB} = (59,222 - j34,644)kV = 68,611e^{j329,7^\circ}$	$\underline{U}_{TRGAC} = (-59,765 - j102,972)kV = 119,058e^{j239,9^\circ}$
$\underline{U}_{TRGC} = (-59,494 - j34,163)kV = 68,605e^{j209,8^\circ}$	$\underline{U}_{TRGCB} = (118,716 - j0,480)kV = 118,717e^{j359,8^\circ}$

Tab. 4.16. Napięcia zasilające układ sieciowy

Napięcia fazowe	Napięcia międzyfazowe
$\underline{E}_A = (0,000 + j69,282)kV = 69,163e^{j90,0^\circ}$	$\underline{E}_{BA} = (-60,000 + j103,923)kV = 120,000e^{j120,0^\circ}$
$\underline{E}_B = (60,000 - j34,641)kV = 69,163e^{j330,0^\circ}$	$\underline{E}_{AC} = (-60,000 - j103,923)kV = 120,000e^{j240,0^\circ}$
$\underline{E}_C = (-60,000 - j34,641)kV = 69,163e^{j210,0^\circ}$	$\underline{E}_{CB} = (120,000 - j0,000)kV = 120,000e^{j360,0^\circ}$

4.8. Obliczenia rozprywu prądów i mocy (asym)

Z rozwiązania iteracyjnego układu znane są napięcia fazowe w węzłach sieci schematu zastępczego z (Rys. 1.2). Można więc obliczać przepływy prądów i mocy w kolejnych odcinkach sieci, najpierw średniego napięcia a dalej przepływy w transformatorze TR 110/SN i na końcu w linii WN 110 kV.

4.8.1. Obliczanie prądów i mocy w linii L2 (asym)

Tab. 4.17. Napięcia prądy i moce w linii L2

Napięcia fazowe na początku linii L2 (na T1 SN)		Napięcia fazowe na końcu linii L2 (na T2 SN)	
$\underline{U}_{T1GA} = (-1,960 + j8,216)kV$		$\underline{U}_{T2GA} = (-1,773 + j8,171)kV$	
$\underline{U}_{T1GB} = (7,063 - j2,193)kV$		$\underline{U}_{T2GB} = (6,790 - j2,492)kV$	
$\underline{U}_{T1GC} = (-5,103 - j6,023)kV$		$\underline{U}_{T2GC} = (-5,017 - j5,678)kV$	
Impedancje linii L2			
$\underline{Z}_{L2A} = (0,240 + j0,680)\Omega$	$\underline{Z}_{L2B} = (0,240 + j0,680)\Omega$	$\underline{Z}_{L2C} = (0,240 + j0,680)\Omega$	
Prądy w linii L2			
$\underline{I}_{L2A} = \frac{\underline{U}_{T1GA} - \underline{U}_{T2GA}}{\underline{Z}_{L1A}} = \frac{(-1,960 + j8,216) - (-1,773 + j8,171)}{(0,240 + j0,680)} = (-0,0266 + j0,2652)kA$		$ \underline{I}_{L2A} = 267A$	
$\underline{I}_{L2B} = \frac{\underline{U}_{T1GB} - \underline{U}_{T2GB}}{\underline{Z}_{L1B}} = \frac{(7,063 - j2,193) - (6,790 - j2,492)}{(0,240 + j0,680)} = (0,5174 - j0,2185)kA$		$ \underline{I}_{L2B} = 562A$	
$\underline{I}_{L2C} = \frac{\underline{U}_{T1GC} - \underline{U}_{T2GC}}{\underline{Z}_{L1C}} = \frac{(-5,103 - j6,023) - (-5,017 - j5,678)}{(0,240 + j0,680)} = (-0,4908 - j0,0467)kA$		$ \underline{I}_{L2C} = 493A$	
Moce w linii L2			
Moce na początku linii L2		Moce na końcu L2	
$\underline{S}_{L2Ap} = \underline{U}_{T1GA} \cdot \underline{I}_{L2A}^* = (-1,960 + j8,216) \cdot (-0,0266 - j0,2652) = 2,231kW + j0,301Mvar$		$\underline{S}_{L2Ak} = \underline{U}_{T2GA} \cdot \underline{I}_{L2A}^* = (-1,773 + j8,171) \cdot (-0,0266 - j0,2652) = 2,214MW + j0,253Mvar$	
$\underline{S}_{L2Bp} = \underline{U}_{T1GB} \cdot \underline{I}_{L2B}^* = (7,063 - j2,193) \cdot (0,5174 + j0,2185) = 4,133MW + j0,409Mvar$		$\underline{S}_{L2Bk} = \underline{U}_{T2GB} \cdot \underline{I}_{L2B}^* = (6,790 - j2,492) \cdot (0,5174 + j0,2185) = 4,058MW + j0,194Mvar$	
$\underline{S}_{L2Cp} = \underline{U}_{T1GC} \cdot \underline{I}_{L2C}^* = (-5,103 - j6,023) \cdot (-0,4908 - j0,0467) = 2,786MW + j2,718Mvar$		$\underline{S}_{L2Ck} = \underline{U}_{T2GC} \cdot \underline{I}_{L2C}^* = (-5,017 - j5,678) \cdot (-0,4908 - j0,0467) = 2,728MW + j2,553Mvar$	
Całkowity przepływ mocy na początku linii L2		Całkowity przepływ mocy na końcu linii L2	
$P_{L2p} = P_A + P_B + P_C = 2,231 + 4,133 + 2,786 = 9,150 MW$ $Q_{L2p} = Q_A + Q_B + Q_C = 0,301 + 0,409 + 2,718 = 3,428 Mvar$		$P_{L2k} = P_A + P_B + P_C = 2,214 + 4,058 + 2,728 = 9,000 MW$ $Q_{L2k} = Q_A + Q_B + Q_C = 0,253 + 0,194 + 2,553 = 3,000 Mvar$	
Straty mocy czynnej		Straty mocy biernej	
$\Delta P_A = R_{L2A} \cdot \underline{I}_{L2A} ^2 = 0,240 \cdot 0,267^2 = 0,017 MW$		$\Delta Q_A = X_{L2A} \cdot \underline{I}_{L2A} ^2 = 0,680 \cdot 0,267^2 = 0,048 Mvar$	
$\Delta P_B = R_{L2B} \cdot \underline{I}_{L2B} ^2 = 0,240 \cdot 0,562^2 = 0,076 MW$		$\Delta Q_B = X_{L1B} \cdot \underline{I}_{L2B} ^2 = 0,680 \cdot 0,562^2 = 0,215 Mvar$	
$\Delta P_C = R_{L2C} \cdot \underline{I}_{L2C} ^2 = 0,240 \cdot 0,496^2 = 0,058 MW$		$\Delta Q_C = X_{L2C} \cdot \underline{I}_{L2C} ^2 = 0,680 \cdot 0,493^2 = 0,165 Mvar$	
Suma strat mocy czynnej w linii L2		Suma strat mocy biernej w linii L2	
$\Delta P_{L2} = \Delta P_A + \Delta P_B + \Delta P_C = 0,017 + 0,076 + 0,058 = 0,151 MW$		$\Delta Q_{L2} = \Delta Q_A + \Delta Q_B + \Delta Q_C = 0,040 + 0,214 + 0,165 = 0,428 Mvar$	

4.8.1. Obliczanie prądów i mocy w linii L1 (asym)

Tab. 4.18. Napięcia prądy i moce w linii L1

Napięcia fazowe na początku linii L1 (na TR SN)		Napięcia fazowe na końcu linii L1 (na T1 SN)	
$\underline{U}_{TRDA} = (-3,634 + j8,632)kV$		$\underline{U}_{T1GA} = (-1,960 + j8,216)kV$	
$\underline{U}_{TRDB} = (8,829 - j1,140)kV$		$\underline{U}_{T1GB} = (7,063 - j2,193)kV$	
$\underline{U}_{TRDC} = (-5,194 - j7,492)kV$		$\underline{U}_{T1GC} = (-5,103 - j6,023)kV$	
Impedancje linii L1			
$\underline{Z}_{L1A} = (0,600 + j1,700)\Omega$	$\underline{Z}_{L1B} = (0,600 + j1,700)\Omega$	$\underline{Z}_{L1C} = (0,600 + j1,700)\Omega$	
Prądy w linii L1			
$\underline{I}_{L1A} = \frac{\underline{U}_{TRDA} - \underline{U}_{T1GA}}{\underline{Z}_{L1A}} = \frac{(-3,634 + j8,632) - (-1,960 + j8,216)}{(0,600 + j1,700)} = (-0,919 + j0,9526)kA$		$ \underline{I}_{L1A} = 957A$	
$\underline{I}_{L1B} = \frac{\underline{U}_{TRDB} - \underline{U}_{T1GB}}{\underline{Z}_{L1B}} = \frac{(8,829 - j1,140) - (7,063 - j2,193)}{(0,600 + j1,700)} = (0,8768 - j0,7293)kA$		$ \underline{I}_{L1B} = 1140A$	
$\underline{I}_{L1C} = \frac{\underline{U}_{TRDC} - \underline{U}_{T1GC}}{\underline{Z}_{L1C}} = \frac{(-5,387 - j5,699) - (-5,103 - j6,023)}{(0,600 + j1,700)} = (-0,7849 - j0,2233)kA$		$ \underline{I}_{L1C} = 816A$	
Moce w linii L1			
Moce na początku linii L1		Moce na końcu L1	
$\underline{S}_{L1Ap} = \underline{U}_{TRDA} \cdot \underline{I}_{L1A}^* = (-3,737 + j8,835) \cdot (-0,919 - j0,9526) = 8,557MW + j2,668Mvar$		$\underline{S}_{L1Ak} = \underline{U}_{T1GA} \cdot \underline{I}_{L1A}^* = (-1,960 + j8,216) \cdot (-0,919 - j0,9526) = 8,007MW + j1,111var$	
$\underline{S}_{L1Bp} = \underline{U}_{TRDB} \cdot \underline{I}_{L1B}^* = (8,829 - j1,140) \cdot (0,8768 + j0,7293) = 8,572MW + j5,439Mvar$		$\underline{S}_{L1Bk} = \underline{U}_{T1GB} \cdot \underline{I}_{L1B}^* = (7,063 - j2,193) \cdot (0,8768 + j0,7293) = 7,792MW + j3,228Mvar$	
$\underline{S}_{L1Cp} = \underline{U}_{TRDC} \cdot \underline{I}_{L1C}^* = (-3,634 + j8,632) \cdot (-0,7849 + j0,2233) = 5,750MW + j4,721Mvar$		$\underline{S}_{L1Ck} = \underline{U}_{T1GC} \cdot \underline{I}_{L1C}^* = (-5,499 - j5,699) \cdot (-0,7849 + j0,2233) = 5,350MW + j3,588Mvar$	
Całkowity przepływ mocy na początku linii L2		Całkowity przepływ mocy na końcu linii L2	
$P_{L1p} = P_A + P_B + P_C = 8,557 + 8,572 + 5,750 = 22,879 MW$ $Q_{L1p} = Q_A + Q_B + Q_C = 2,668 + 5,439 + 4,721 = 12,828 Mvar$		$P_{L1k} = P_A + P_B + P_C = 8,007 + 7,792 + 5,350 = 21,149 MW$ $Q_{L1k} = Q_A + Q_B + Q_C = -0,111 + 3,228 + 3,588 = 7,927 Mvar$	
Straty mocy czynnej		Straty mocy biernej	
$\Delta P_A = R_{L1A} \cdot \underline{I}_{L1A} ^2 = 0,600 \cdot 0,957^2 = 0,550 MW$		$\Delta Q_A = X_{L1A} \cdot \underline{I}_{L1A} ^2 = 1,700 \cdot 0,957^2 = 1,557 Mvar$	
$\Delta P_B = R_{L1B} \cdot \underline{I}_{L1B} ^2 = 0,600 \cdot 1,140^2 = 0,780 MW$		$\Delta Q_B = X_{L1B} \cdot \underline{I}_{L1B} ^2 = 1,700 \cdot 1,140^2 = 2,211 Mvar$	
$\Delta P_C = R_{L1C} \cdot \underline{I}_{L1C} ^2 = 0,600 \cdot 0,816^2 = 0,400 MW$		$\Delta Q_C = X_{L1C} \cdot \underline{I}_{L1C} ^2 = 1,700 \cdot 0,816^2 = 1,132 Mvar$	
Suma strat mocy czynnej w linii L2		Suma strat mocy biernej w linii L2	
$\Delta P_{L2} = \Delta P_A + \Delta P_B + \Delta P_C = 0,550 + 0,780 + 0,400 = 1,730 MW$		$\Delta Q_{L2} = \Delta Q_A + \Delta Q_B + \Delta Q_C = 1,557 + 2,211 + 1,132 = 4,900 Mvar$	

4.8.2. Obliczanie prądów i mocy w transformatorze TR (asym)

Tab. 4.19. Napięcia prądy i moce w transformatorze TR

Napięcia fazowe za impedancją transformatora		Napięcia fazowe na stronie dolnej transformatora	
$\underline{U}'_{TRGA} = (-4,883 + j8,570)kV$		$\underline{U}_{TRDA} = (-3,634 + j8,632)kV$	
$\underline{U}'_{TRGB} = (9,834 - j0,040)kV$		$\underline{U}_{TRDB} = (8,829 - j1,140)kV$	
$\underline{U}'_{TRGC} = (-4,951 - j8,530)kV$		$\underline{U}_{TR1GAC} = (-5,194 - j7,492)kV$	
Impedancje transformatora TR			
$\underline{Z}_{TRA} = (0,610 + j1,3068)\Omega$	$\underline{Z}_{TRB} = (0,610 + j1,3068)\Omega$	$\underline{Z}_{TRC} = (0,610 + j1,3068)\Omega$	
Prądy w transformatorze TR			
$\underline{I}_{TRA} = \frac{\underline{U}'_{TRGA} - \underline{U}_{TRDA}}{\underline{Z}_{L1A}} = \frac{(-4,883 + j8,570) - (-3,634 + j8,632)}{(0,610 + j1,73068)} = (-0,0919 + j0,9526)kA$		$ \underline{I}_{TRA} = 957A$	
$\underline{I}_{TRB} = \frac{\underline{U}'_{TRGB} - \underline{U}_{TRDB}}{\underline{Z}_{TRB}} = \frac{(9,834 - j0,040) - (8,829 - j1,140)}{(0,610 + j1,73068)} = (0,8768 - j0,7293)kA$		$ \underline{I}_{TRB} = 1140A$	
$\underline{I}_{TRC} = \frac{\underline{U}'_{TRGC} - \underline{U}_{TRDC}}{\underline{Z}_{TRC}} = \frac{(-4,951 - j8,530) - (-5,194 - j7,492)}{(0,610 + j1,73068)} = (-0,7849 - j0,2233)kA$		$ \underline{I}_{TRC} = 816A$	
Moce w transformatorze TR			
Moce na początku transformatora TR		Moce na końcu transformatora TR	
$\underline{S}_{TRAp} = \underline{U}'_{TRGA} \cdot \underline{I}_{TRA}^* = (-4,883 + j8,570) \cdot (-0,0919 - j0,9526) = 8,613MW + j3,864Mvar$		$\underline{S}_{TRAk} = \underline{U}_{TRDA} \cdot \underline{I}_{TRA}^* = (-3,634 + j8,632) \cdot (-0,0919 - j0,9526) = 8,557MW + j2,668Mvar$	
$\underline{S}_{TRBp} = \underline{U}'_{TRGB} \cdot \underline{I}_{TRB}^* = (9,834 - j0,040) \cdot (0,8768 + j0,7293) = 8,652MW + j7,137Mvar$		$\underline{S}_{TRBk} = \underline{U}_{TRDB} \cdot \underline{I}_{TRB}^* = (8,829 - j1,140) \cdot (0,8768 + j0,7293) = 8,572MW + j5,439Mvar$	
$\underline{S}_{TRCp} = \underline{U}'_{TRGC} \cdot \underline{I}_{TRC}^* = (-4,951 - j8,530) \cdot (-0,8565 + j0,3676) = 5,790MW + j5,589Mvar$		$\underline{S}_{TRCk} = \underline{U}_{TRDC} \cdot \underline{I}_{TRC}^* = (-5,194 - j7,492) \cdot (-0,8565 + j0,3676) = 5,750MW + j4,721Mvar$	
Całkowity przepływ mocy na początku transformatora TR		Całkowity przepływ mocy na końcu linii L2	
$P_{TRp} = P_A + P_B + P_C = 8,613 + 8,652 + 5,790 = 23,055 MW$ $Q_{TRp} = Q_A + Q_B + Q_C = 3,864 + 7,137 + 5,589 = 16,590 Mvar$		$P_{TRk} = P_A + P_B + P_C = 8,557 + 8,572 + 5,750 = 22,879 MW$ $Q_{TRk} = Q_A + Q_B + Q_C = 2,668 + 5,439 + 4,721 = 12,828 Mvar$	
Straty mocy czynnej		Straty mocy biernej	
$\Delta P_A = R_{TRA} \cdot \underline{I}_{TRA} ^2 = 0,610 \cdot 0,957^2 = 0,056 MW$		$\Delta Q_A = X_{TRA} \cdot \underline{I}_{TRA} ^2 = 1,3068 \cdot 0,957^2 = 1,196var$	
$\Delta P_B = R_{TRB} \cdot \underline{I}_{TRB} ^2 = 0,610 \cdot 1,140^2 = 0,079 MW$		$\Delta Q_B = X_{TRB} \cdot \underline{I}_{TRB} ^2 = 1,3068 \cdot 1,140^2 = 1,698Mvar$	
$\Delta P_C = R_{TRC} \cdot \underline{I}_{TRC} ^2 = 0,610 \cdot 0,816^2 = 0,041MW$		$\Delta Q_C = X_{TRC} \cdot \underline{I}_{TRC} ^2 = 1,3068 \cdot 0,816^2 = 0,869Mvar$	
Suma strat mocy czynnej w transformatorze TR		Suma strat mocy biernej w linii TR	
$\Delta P_{TR} = \Delta P_A + \Delta P_B + \Delta P_C = 0,056 + 0,079 + 0,041 = 0,176MW$		$\Delta Q_{TR} = \Delta Q_A + \Delta Q_B + \Delta Q_C = 1,196 + 1,698 + 0,869 = 3,763 Mvar$	

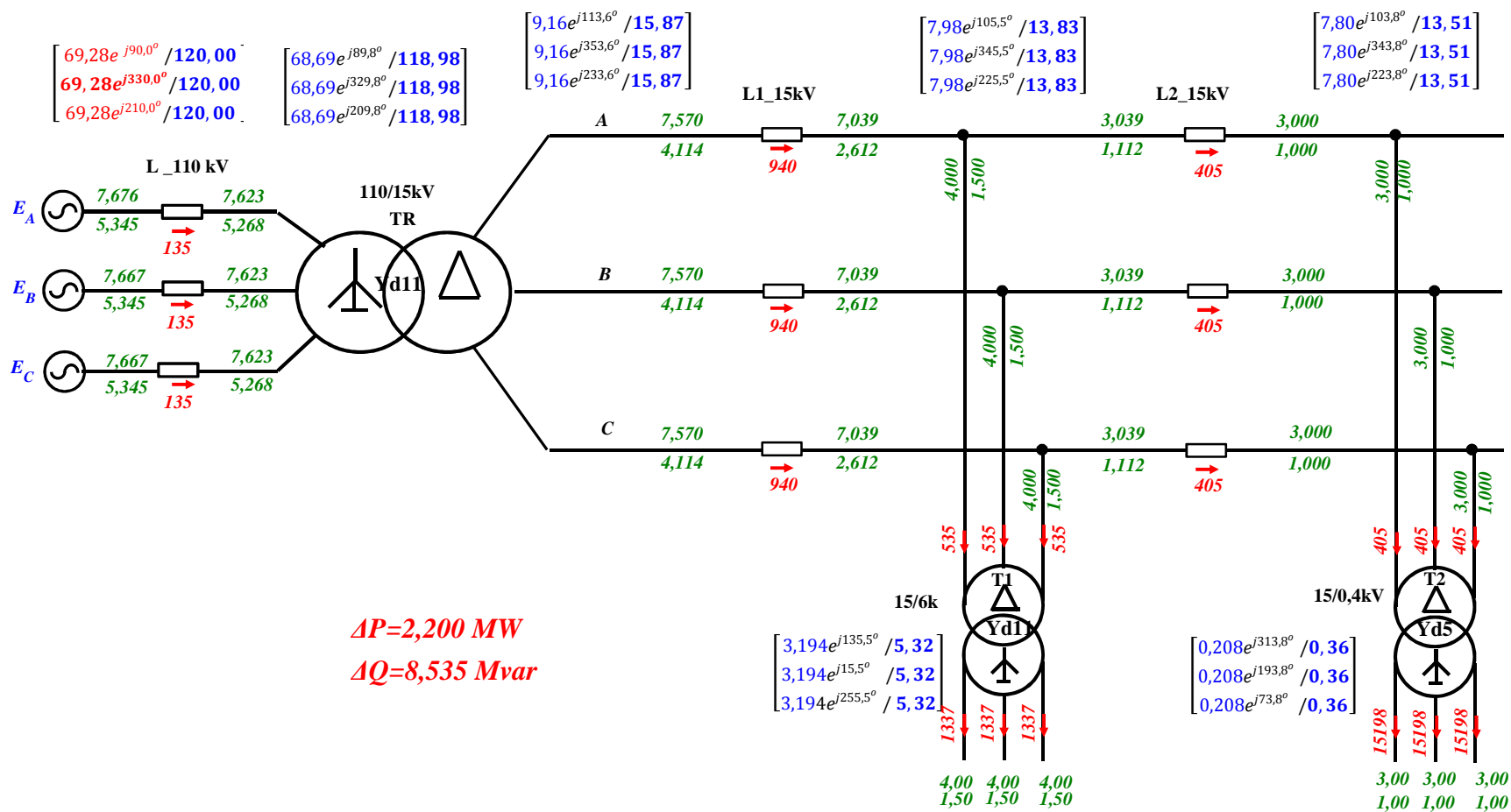
4.8.1. Obliczanie prądów i mocy w linii 110 kV (WN) (asym)

Tab. 4.20. Napięcia prądy i moce w linii WN

Napięcia fazowe na początku linii WN (SEM)		Napięcia fazowe na końcu linii WN	
$\underline{E}_A = (0,000 + j69,282)kV$		$\underline{U}_{TRGA} = (0,271 + j68,807)kV$	
$\underline{E}_B = (60,000 - j34,641)kV$		$\underline{U}_{TRGB} = (59,222 - j34,644)kV$	
$\underline{E}_C = (-60,000 - j34,641)kV$		$\underline{U}_{TRGC} = (-59,494 - j34,163)kV$	
Impedancje transformatora linii WN			
$\underline{Z}_{WNA} = (2,40 + j4,20)\Omega$		$\underline{Z}_{WNB} = (2,40 + j4,20)\Omega$	
		$\underline{Z}_{WNC} = (2,40 + j4,20)\Omega$	
Prądy w linii WN			
$\underline{I}_{WNA} = \frac{\underline{E}_A - \underline{U}_{TRGA}}{\underline{Z}_{WNA}} = \frac{(0,000 + j69,282) - (0,271 + j68,807)}{(2,40 + j4,20)} = (0,0574 + j0,0974)kA$		$ \underline{I}_{WNA} = 113A$	
$\underline{I}_{WNB} = \frac{\underline{E}_B - \underline{U}_{TRGB}}{\underline{Z}_{WNB}} = \frac{(60,000 - j34,641) - (59,222 - j34,644)}{(2,40 + j4,20)} = (0,0802 - j0,1393)kA$		$ \underline{I}_{WNB} = 161A$	
$\underline{I}_{WNC} = \frac{\underline{E}_C - \underline{U}_{TRGC}}{\underline{Z}_{WNC}} = \frac{(-60,000 - j34,641) - (-59,494 - j34,163)}{(2,40 + j4,20)} = (-0,1376 + j0,0419)kA$		$ \underline{I}_{WNC} = 144A$	
Moce w linii WN			
Moce na początku linii WN		Moce na końcu WN	
$\underline{S}_{WNAp.} = \underline{E}_A \cdot \underline{I}_{WNA}^* = (0,000 + j69,282) \cdot (0,0574 - j0,0974) = 6,749W + j3,977Mvar$		$\underline{S}_{WNAk.} = \underline{U}_{TRGA} \cdot \underline{I}_{WNA}^* = (0,271 + j68,807) \cdot (0,0574 - j0,0974) = 6,718MW + j3,923Mvar$	
$\underline{S}_{WNBp.} = \underline{E}_B \cdot \underline{I}_{WNB}^* = (60,000 - j34,641) \cdot (0,0802 + j0,1393) = 9,641MW + j5,580Mvar$		$\underline{S}_{WNBk.} = \underline{U}_{TRGB} \cdot \underline{I}_{WNB}^* = (59,222 - j34,644) \cdot (0,0802 + j0,1393) = 9,579MW + j5,471Mvar$	
$\underline{S}_{WNCp.} = \underline{E}_C \cdot \underline{I}_{WNC}^* = (-60,000 - j34,641) \cdot (-0,1376 - j0,0419) = 6,807MW + j7,283Mvar$		$\underline{S}_{WNCk.} = \underline{U}_{TRGC} \cdot \underline{I}_{WNC}^* = (-59,494 - j34,163) \cdot (-0,1376 - j0,0419) = 6,758MW + j7,196Mvar$	
Całkowity przepływ mocy na początku linii LWN		Całkowity przepływ mocy na końcu linii LWN	
$\underline{P}_{L1p.} = P_A + P_B + P_C = 6,749 + 8,652 + 6,807 = 23,197 MW$ $\underline{Q}_{L1p.} = Q_A + Q_B + Q_C = 3,977 + 5,580 + 7,283 = 16,840 Mvar$		$\underline{P}_{Wnk.} = P_A + P_B + P_C = 6,718 + 8,295 + 6,758 = 23,055 MW$ $\underline{Q}_{Wnk.} = Q_A + Q_B + Q_C = 3,923 + 5,471 + 7,196 = 16,590 Mvar$	
Straty mocy czynnej		Straty mocy biernej	
$\Delta P_A = R_{L1A} \cdot \underline{I}_{L1A} ^2 = 2,40 \cdot 0,113^2 = 0,031 MW$		$\Delta Q_A = X_{WNA} \cdot \underline{I}_{WNA} ^2 = 4,20 \cdot 0,113^2 = 0,054 Mvar$	
$\Delta P_B = R_{L1B} \cdot \underline{I}_{L1B} ^2 = 2,40 \cdot 0,161^2 = 0,062 MW$		$\Delta Q_B = X_{WNB} \cdot \underline{I}_{WNB} ^2 = 4,20 \cdot 0,161^2 = 0,109 Mvar$	
$\Delta P_C = R_{L1C} \cdot \underline{I}_{L1C} ^2 = 2,40 \cdot 0,144^2 = 0,050 MW$		$\Delta Q_C = X_{WNC} \cdot \underline{I}_{WNC} ^2 = 4,20 \cdot 0,144^2 = 0,087 Mvar$	
Suma strat mocy czynnej w linii LWN		Suma strat mocy biernej w linii LWN	
$\Delta P_{L2} = \Delta P_A + \Delta P_B + \Delta P_C = 0,031 + 0,062 + 0,050 = 0,143 MW$		$\Delta Q_{L2} = \Delta Q_A + \Delta Q_B + \Delta Q_C = 0,054 + 0,109 + 0,087 = 0,250 Mvar$	

5. Wyniki obliczeń przy obciążeniu symetrycznym

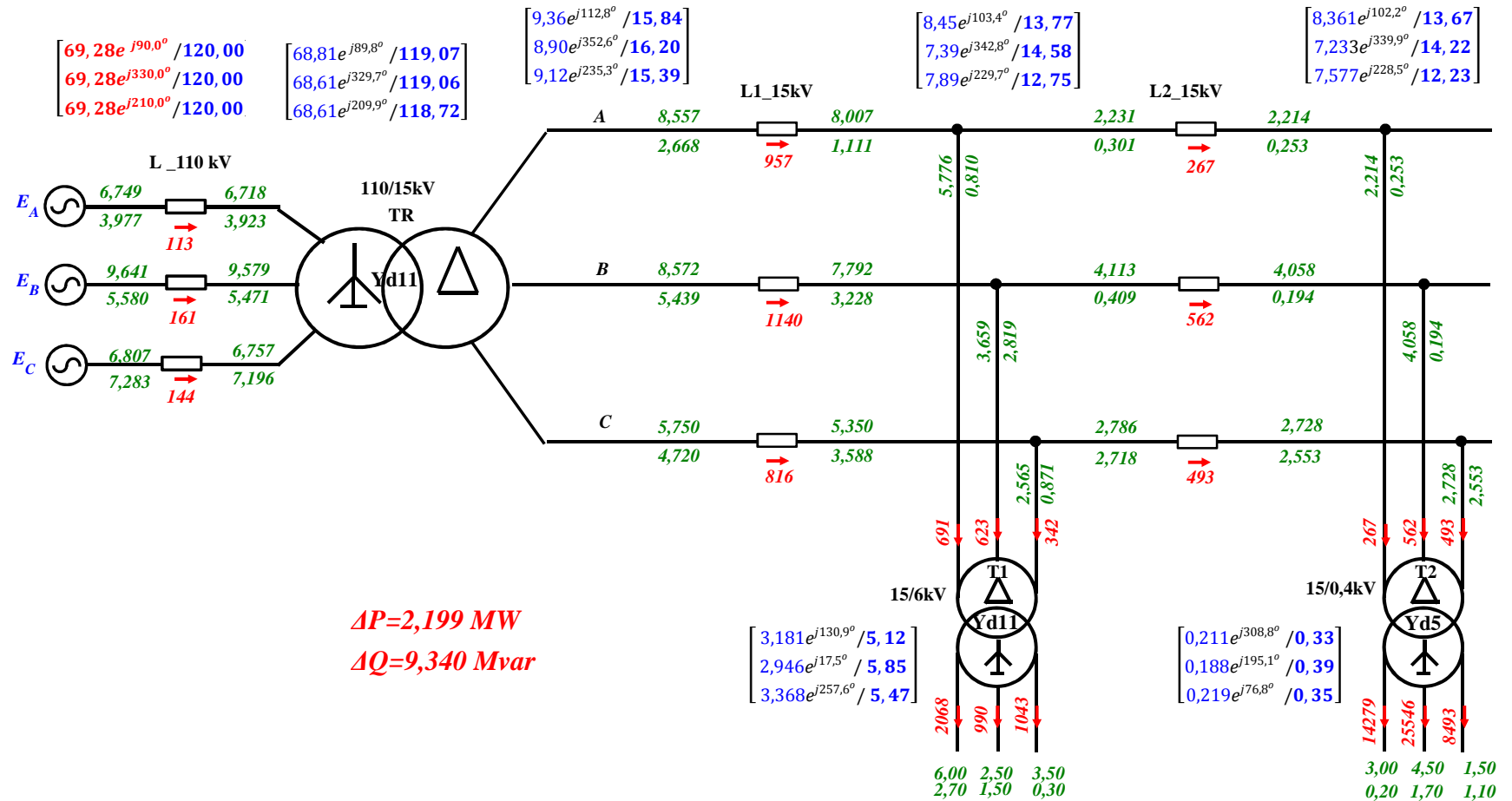
Wyniki obliczeń przedstawiono na schemacie jak na (Rys. 5.1). Kolorem niebieskim oznaczono napięcia wyrażone w kV, kolorem czerwonym prądy w Amperach, zaś zielonym moce w MW i Mvar.



Rys. 5.1. Wyniki obliczeń przy obciążeniu symetrycznym

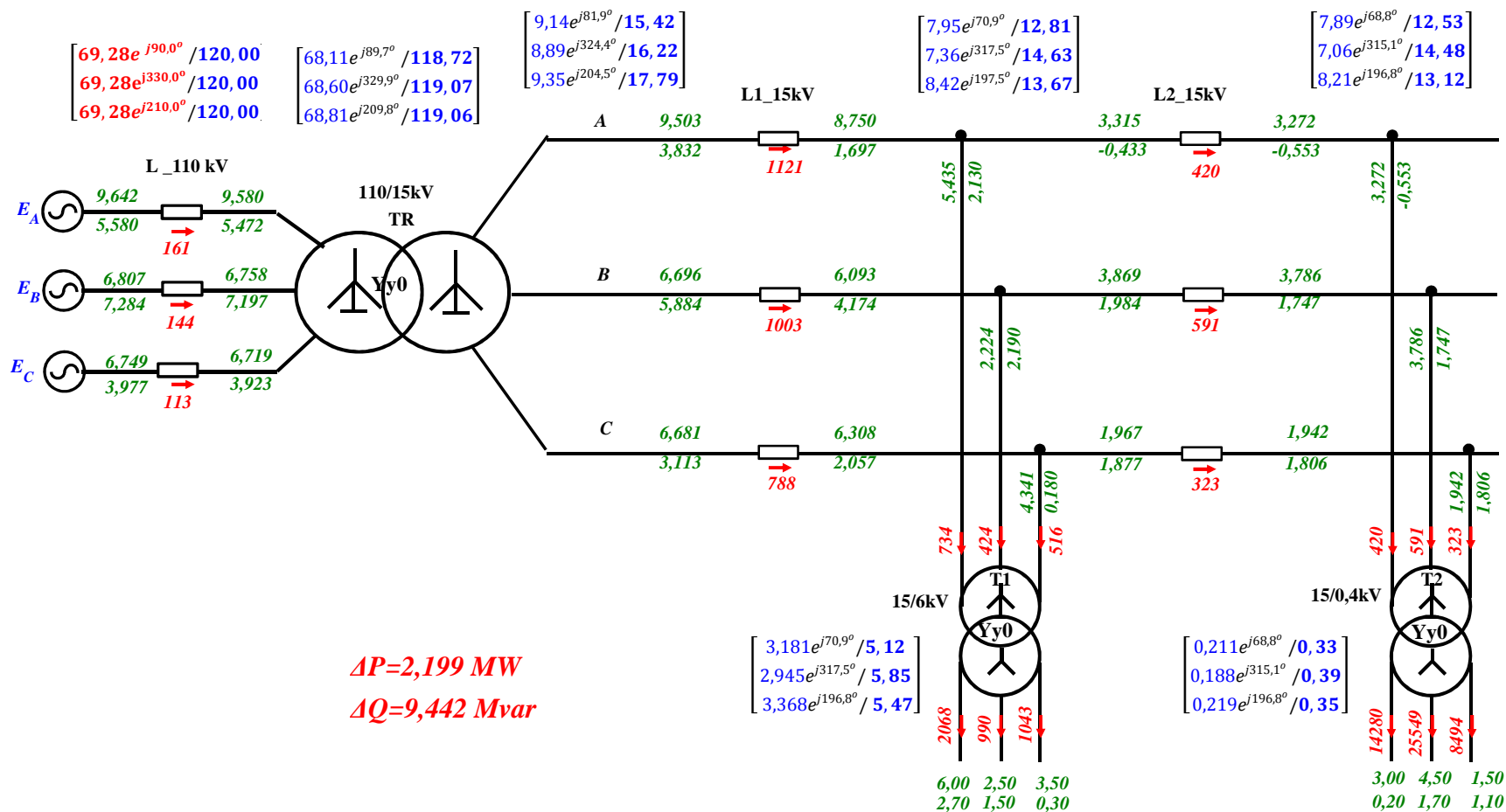
6. Wyniki obliczeń przy obciążeniu niesymetrycznym

Wyniki obliczeń przedstawiono na schemacie jak na (*Błąd! Nie można odnaleźć źródła odwołania.*). Kolorem niebieskim oznaczono napięcia wyrażone w kV, kolorem czerwonym prądy w Amperach, zaś zielonym moce w MW i Mvar.



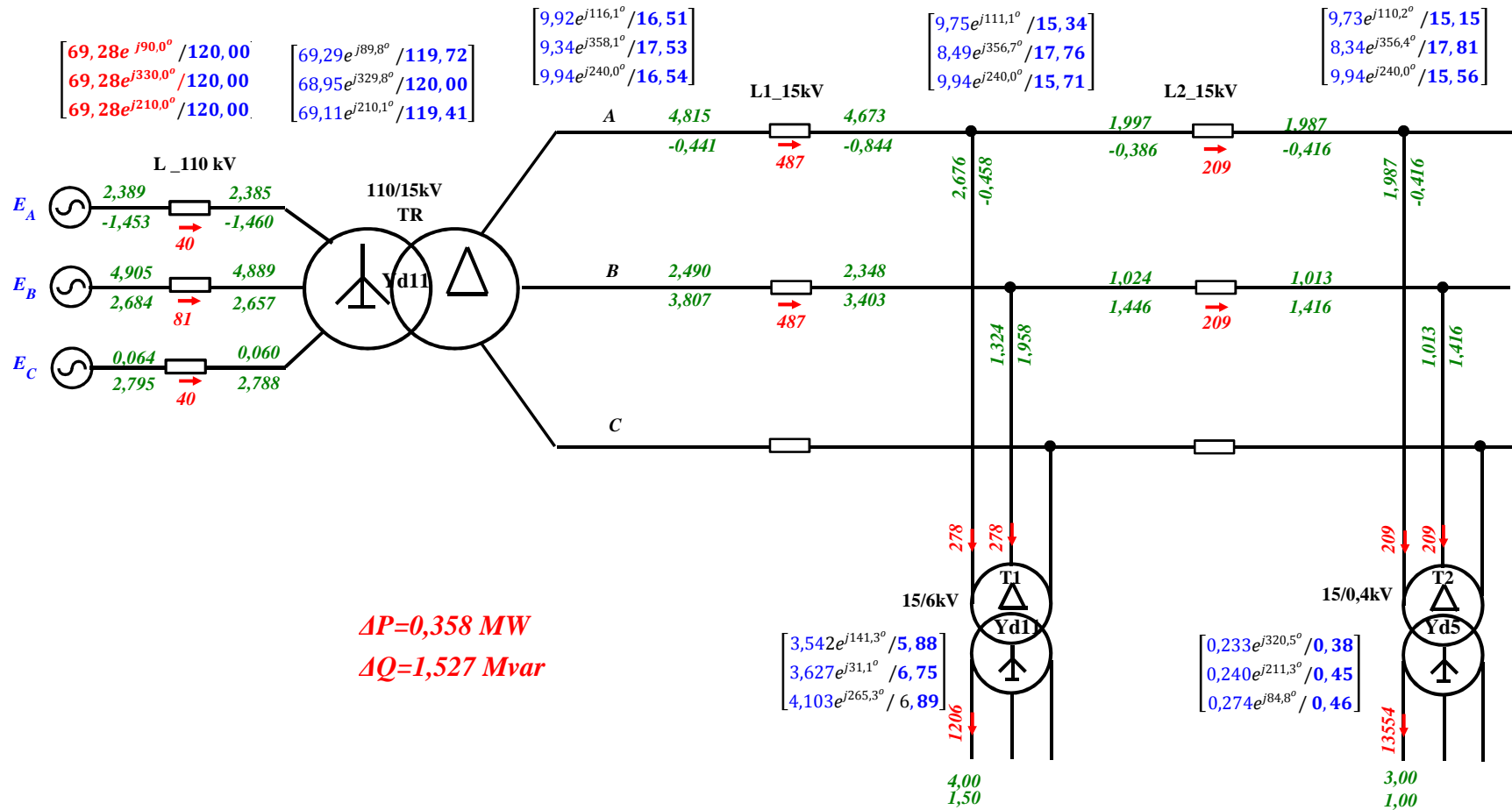
Rys. 6.1. Wyniki obliczeń przy obciążeniu niesymetrycznym

7. Wyniki obliczeń przy gwiazdowym układzie połączeń uzwojeń transformatorów



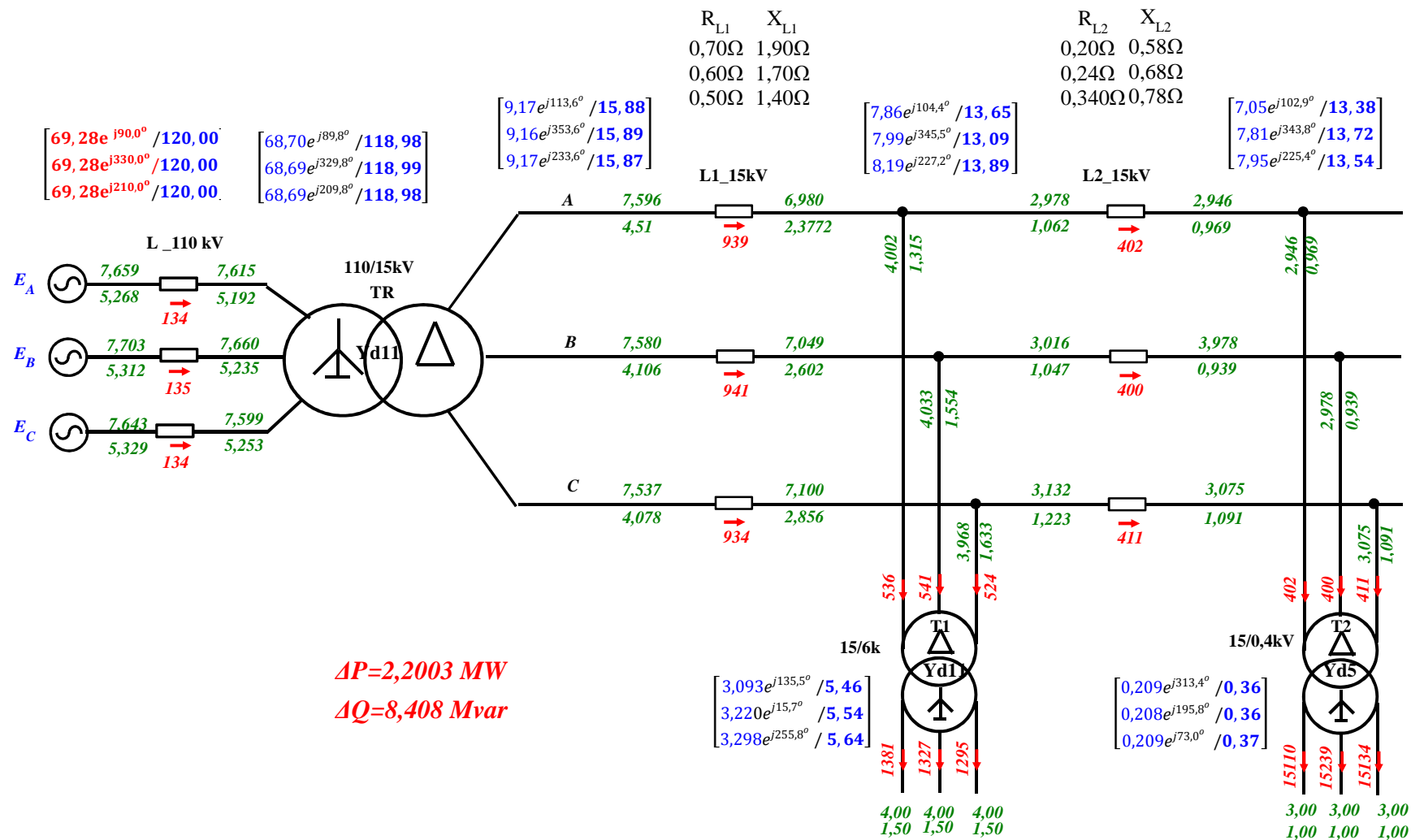
Rys. 7.1. Wyniki obliczeń przy gwiazdowym układzie połączeń uzwojeń transformatorów

8. Wyniki obliczeń przy obciążeniu jednej fazy



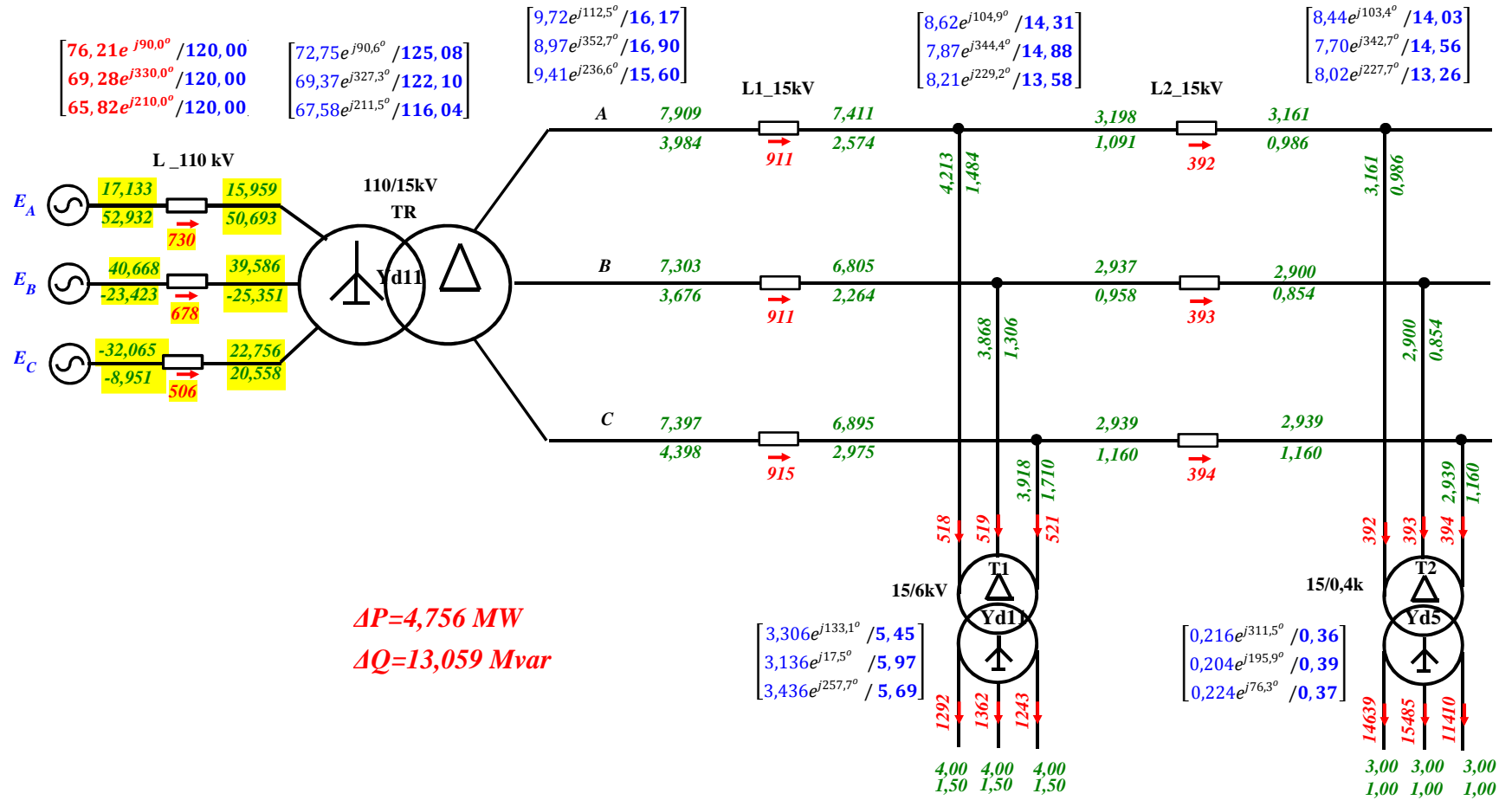
Rys. 8.1. Wyniki obliczeń przy obciążeniu jednej fazy

9. Wyniki przy asymetrii linii średniego napięcia



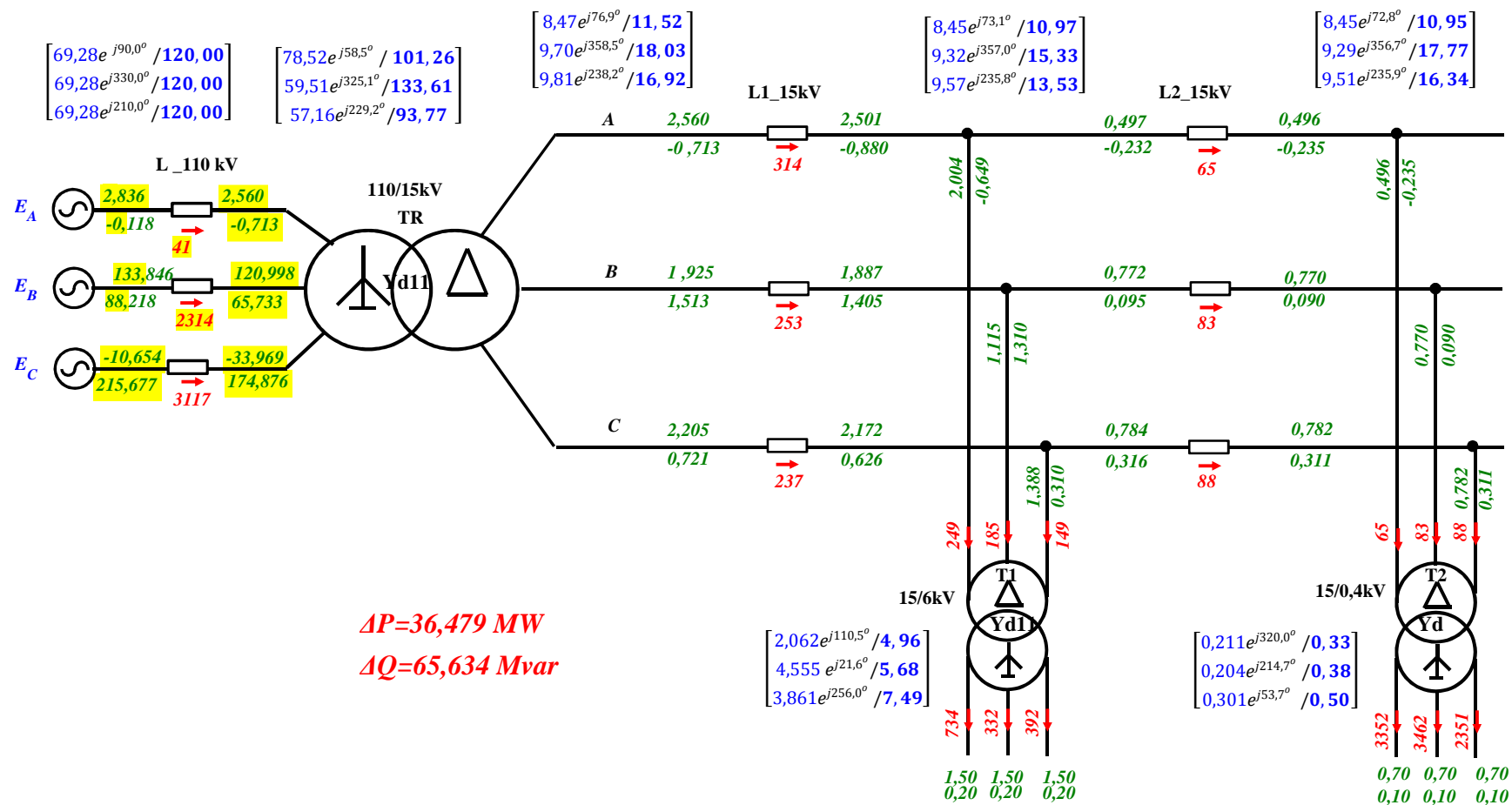
Rys. 9.1. Wyniki obliczeń przy asymetrii linii średniego napięcia

10. Wyniki przy zasilaniu asymetrycznym



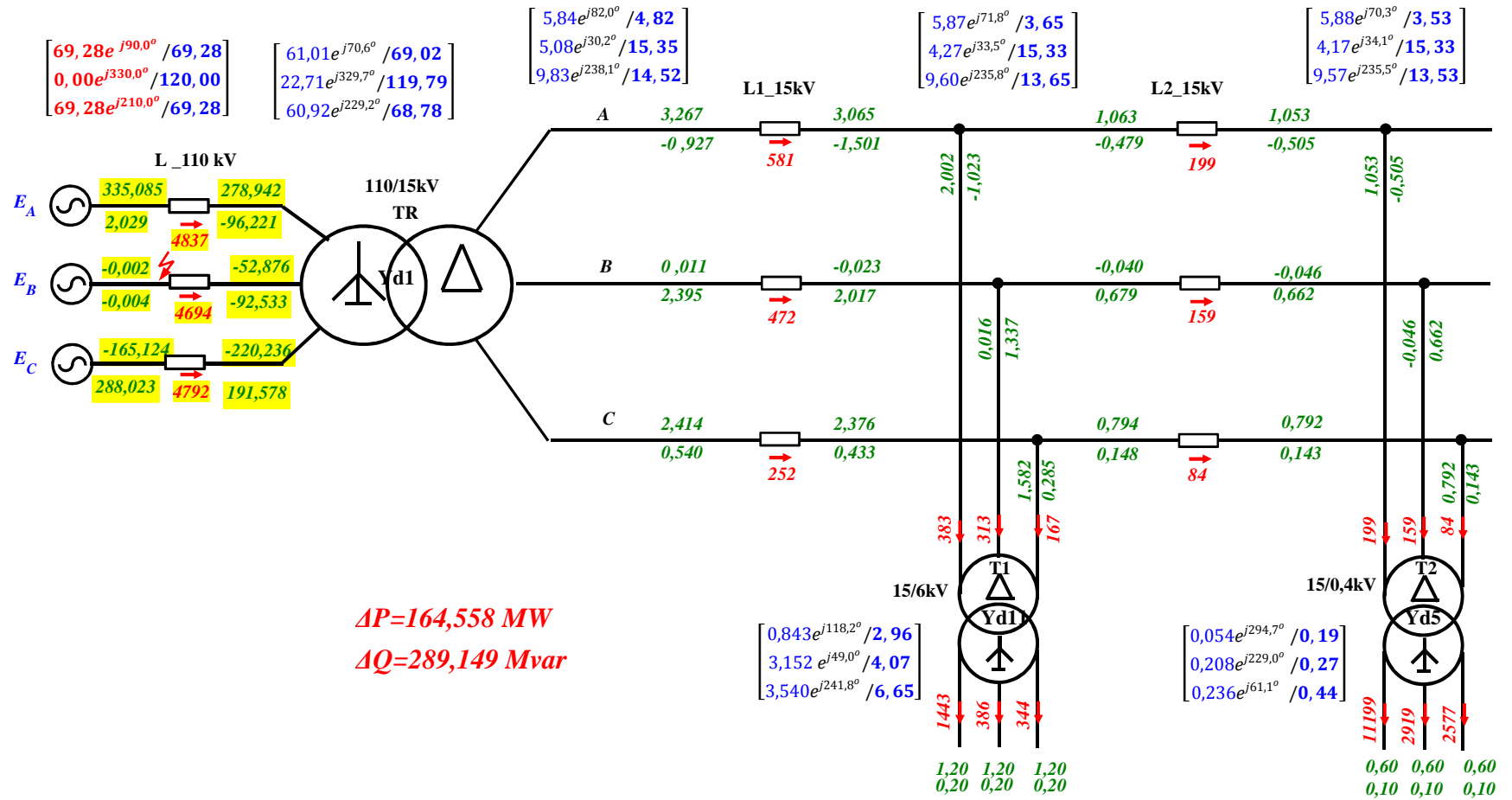
Rys. 10.1. Wyniki obliczeń przy zasilaniu asymetrycznym

11. Wyniki – przerwa w fazie A linii WN



Rys. 11.1. Wyniki obliczeń – przerwa w fazie A linii WN

12. Wyniki przy zwarciu fazy B w linii WN



Rys. 12.1. Wyniki obliczeń przy zwarciu fazy B w linii WN

13. Podsumowanie

Analiza rozptyłu mocy w sieci przy obciążeniu asymetrycznych prowadzi do następujących wniosków:

1. Występuje znaczna różnica asymetrii przepływów mocy w fazach po stronie górnych transformatorów T1,T2 w stosunku do przepływów mocy po stronach dolnych np. w fazie A transformatora T1 po stronie dolnej jest $(3,50+j0,30)$ MVA, natomiast po stronie górnej jest $(2,565+j0,871)$ MVA. Podobnie jest z przepływami mocy w transformatorze TR (110/15kV).
2. Oczywiste jest że występuje asymetria modułów i kątów napięć w sieci – zarówno w sieci nN jak i SN, a także na stronie górnej (110kV) transformatora TR (na końcu linii WN).
3. Gwiazdy napięć fazowych stron dolnych transformatorów są mocno przesunięte w stosunku do wektorów napięć fazowych stron górnych transformatorów – wynika to z przesunięć godzinowych wynikających z układu połączeń (YD11)

Tab. 13.1. Porównanie strat mocy ΔP [MW], ΔQ [Mvar]

$\Delta P, \Delta Q$	Faza	Sieć	WN	TR	L1	L2
Obciążenie symetryczne						
ΔP	A	0,668	0,044	0,054	0,531	0,039
	B	0,668	0,044	0,054	0,531	0,039
	C	0,668	0,044	0,054	0,531	0,039
$\Sigma \Delta P$	A,B,C	2,005	0,132	0,162	1,593	0,118
ΔQ	A	2,844	0,076	1,154	1,502	0,112
	B	2,844	0,076	1,154	1,502	0,112
	C	2,844	0,076	1,154	1,502	0,112
$\Sigma \Delta Q$	A,B,C	8,532	0,228	3,462	4,506	0,336
Obciążenie niesymetryczne						
ΔP	A	0,654	0,031	0,056	0,550	0,017
	B	0,997	0,062	0,079	0,780	0,076
	C	0,549	0,050	0,041	0,400	0,058
$\Sigma \Delta P$	A,B,C	2,200	0,114	0,176	1,730	0,151
ΔQ	A	2,855	0,054	1,196	1,557	0,048
	B	4,233	0,109	1,698	2,211	0,215
	C	2,253	0,087	0,869	1,132	0,165
$\Sigma \Delta Q$	A,B,C	9,341	0,250	3,763	4,900	0,428

Jak widać przy obciążeniu asymetrycznym straty mocy czynnej i biernej wzrastają w każdym elemencie sieci, a więc i w całej sieci są zwiększone o ok. 10%.