



**Seria: Wykłady**

---

## ***Systemy elektroenergetyczne***

***Wykład 1***

### ***Struktura systemu elektroenergetycznego***

**Autor:**

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

Warszawa, 2020

## **Spis treści**

1.	Struktura systemu elektroenergetycznego.....	3
2.	Metody rozwiązywania trójfazowych obwodów elektrycznych prądu przemiennego .....	6
3.	Praca układów trójfazowych .....	10
3.1.	W stanie symetrycznego obciążenia o charakterze indukcyjnym .....	10
3.2.	W stanie niesymetrycznego obciążenia.....	12

## 1. Struktura systemu elektroenergetycznego

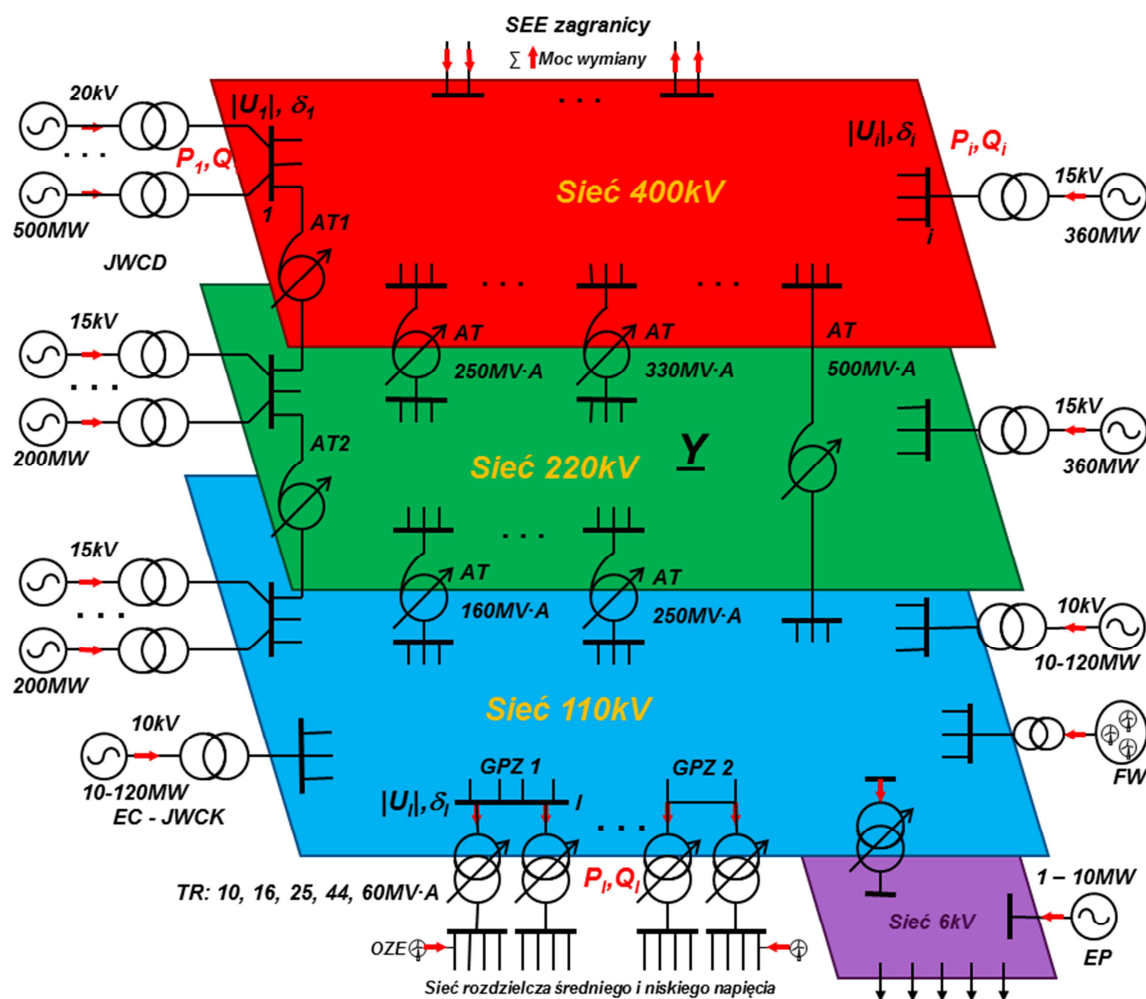
Energia elektryczna jest najwygodniejszym w użytkowaniu rodzajem energii, a w wielu zastosowaniach jest wprost nie zastępowalna. System elektroenergetyczny, porównywany z innymi systemami gospodarczymi, pełni rolę: wytwórcy, transportu hurtowego, dystrybucji detalicznej z natychmiastową dostawą do domu na każde żądanie. Różni go od innych systemów niemożność magazynowania produktu, cała produkcja jest natychmiast (niemal) konsumowana. Odbiorcy wpływają więc w trybie natychmiastowym na wielkość produkcji.

*System elektroenergetyczny (SEE)* jest to zespół funkcjonalnie połączonych urządzeń, służących do wytwarzania, przesyłu i rozdziału energii elektrycznej.

System elektroenergetyczny nie ma dużych możliwości robienia zapasów - możliwości magazynowania energii elektrycznej. Produkcja energii elektrycznej musi więc być dostosowana do wymagań odbiorców. Energii elektrycznej nie magazynuje się bezpośrednio, można jej jednak użyć do magazynowania innych nośników energii. Jedynym powszechnie stosowanym sposobem magazynowania jest przetwarzanie energii elektrycznej na energię potencjalną gromadzoną w zbiornikach wodnych. Powszechnie stosowanym tutaj środkiem są elektrownie szczytowo-pompowe, w których w godzinach małego zapotrzebowania na energię elektryczną przepompowuje się wodę ze zbiornika dolnego do górnego, a w godzinach zwiększonego zapotrzebowania ten sam zespół urządzeń wytwarza energię elektryczną, pracując jako elektrownia wodna. Elektrownie szczytowo-pompowe są też powszechnie wykorzystywane interwencyjnie - w przypadku nagłych ubytków mocy wytwarzanej w innych elektrowniach.

SEE jest sterowany jako całość, lecz zarządzany jest przez wiele podmiotów gospodarczych, finansowo i administracyjnie niezależnych, lecz muszących ze sobą współpracować. SEE krajów sąsiadujących są łączone ze sobą w celu poprawy warunków pracy, tworząc jeden duży system elektroenergetyczny.

Ogólną konfigurację SEE przedstawia **Błąd! Nie można odnaleźć źródła odwołania..** Większość energii elektrycznej jest wytwarzana w elektrowniach, gdzie generatory o mocach 360 MW, 200 MW poprzez transformatory blokowe dostarczają energię elektryczną do sieci przesyłowej: 400 kV i 220 kV, a także do sieci o napięciu 110 kV. Tak więc w jednej elektrowni zainstalowane jest po kilka generatorów kilku grupach, pracujących na różne sieci - 400, 220 czy 110 kV.



Rys. 1.1. Ogólna konfiguracja SEE.

Energia elektryczna jest też wytwarzana w elektrociepłowniach, ale tam moce generatorów są zwykle poniżej 100 MW, a generatory te dostarczają energię elektryczną poprzez transformatory blokowe wyłącznie do sieci 110 kV. W dużych zakładach przemysłowych energia elektryczna jest też wytwarzana we własnych elektrociepłowniach, ale zwykle dostarczana bezpośrednio do sieci średniego napięcia (6 kV). Energetyka przemysłowa i małe elektrownie wodne wytwarzają w Polsce poniżej 5% energii elektrycznej.

Energia elektryczna wytwarzana w elektrowniach jest przesyłana do odbiorców przez sieć przesyłową. Sieć tą stanowią linie przesyłowe o napięciu 400 kV i 220 kV jak i linie o napięciu 110 kV. Sieć linii 400 kV jest powiązana autotransformatarami 440/220 kV z siecią linii 220 kV jak też z siecią linii 110 kV - transformatarami i autotransformatarami 400/110 kV. Podobnie sieć linii 220 kV jest powiązana autotransformatarami 220/110 kV z siecią linii 110 kV. Tak więc sieci te pracują równolegle, każda z linii 400 kV i 220 kV czy 110 kV jest rezerwowana przez inne linie o tym samym napięciu, a także przez połączenia sieciowe na innym napięciu. Wynika z tego że energia elektryczna wytwarzana w danej

elektrowni może do odbiorcy płynąć wieloma równoległymi połączeniami - zgodnie z prawami teorii obwodów elektrycznych.

Energia elektryczna do sieci rozdzielczej średniego napięcia jest dostarczana wyłącznie z sieci 110 kV poprzez transformatory 110/SN, a w sieci rozdzielczej przepływ energii elektrycznej odbywa się jednokierunkowo, przez linie średniego napięcia i transformatory SN/nN i linie niskiego napięcia (nN) do odbiorcy. Należy zaznaczyć, że w sieci średniego i niskiego napięcia przepływ energii elektrycznej od sieci 110 kV do konkretnego odbiorcy odbywa się przez z góry ustalony układ połączeń linii SN, transformatorów SN/nN i linii nN - nie ma elektrycznych połączeń równoległych.

System elektroenergetyczny charakteryzuje się za pomocą wielu **parametrów**:

- moc zainstalowana w elektrowniach,
- struktura mocy zainstalowanej,
- moc szczytowa,
- moc dyspozycyjna,
- moc największej elektrowni,
- moc największych bloków,
- napięcia znamionowe sieci,
- najwyższe napięcie sieci przesyłowej,
- struktura sieci,
- największa odległość przesyłu energii elektrycznej,
- struktura mocy zapotrzebowanej - zmienność dobową, roczną obciążenia.

Energia elektryczna dostarczana odbiorcom powinna mieć właściwą jakość. Wskaźnikami **jakości energii** elektrycznej są:

- właściwa wartość napięcia na odbiornikach,
- częstotliwość,
- symetria fazowa napięć,
- kształt krzywej napięcia (zawartość wyższych harmonicznych THD),
- bezprzerwowość zasilania (*AIT, ENS, SAIDI, SAIFI i MAIFI*),
- małe wahania napięcia (krótkotrwałe),
- brak zaników napięcia.

Proces dostawy energii elektrycznej powinien być prowadzony w sposób racjonalny, to jest taki, który wymaga minimalnych nakładów przy maksymalizacji zysków - sprzedaży odpowiedniej ilości energii elektrycznej z zachowaniem wszystkich parametrów jakościowych energii elektrycznej, zwłaszcza niezawodności zasilania. Nakłady związane z produkcją, przesyłem i rozdziałem energii elektrycznej stanowią koszty inwestycyjne (koszty budowy elektrowni, sieci, stacji i innych urządzeń elektrycznych) oraz koszty eksploatacyjne (koszty zakupu węgla i innych surowców), a także koszty związane na przykład z

zatrudnieniem odpowiedniej ilości personelu, a także koszty związane ze stratami podczas przesyłu energii elektrycznej od elektrowni do odbiorców.

Jak w każdej działalności technicznej występuje tutaj podstawowa sprzeczność między kryterium technicznym a ekonomicznym. Zwiększenie wskaźników jakościowych energii elektrycznej wiąże się z dodatkowymi nakładami, wydatkami bądź na rozwój ilościowy urządzeń elektrycznych (wybudowanie rezerwowej linii), ale duże zyski są osiągnięte poprzez stosowanie nowych technik i technologii czy sposobów zarządzania, które zawierają dużą ilość myśli technicznej.

System elektroenergetyczny nie posiada jednoznacznego podziału na części elementarne. W trakcie niektórych rozważań za elementy SEE można uznać:

- elektrownie,
- linie elektroenergetyczne,
- stacje elektroenergetyczne,
- transformatory,
- dławiki, baterie kondensatorów,
- automatyka pomiarowa i sterująca,
- automatyka prewencyjna i zabezpieczeniowa.

Niekiedy taki podział jest niewystarczający i na przykład w elektrowni trzeba wyróżnić: kotły, turbiny, generatory, regulatory kotłowe, regulatory prędkości i wzbudzenia. Z kolei w stacjach elektroenergetycznych wyróżnia się: szyny, wyłączniki, odłączniki, automatykę zabezpieczeniową i prewencyjną. Z drugiej strony w obliczeniach rozptyłów mocy w sieci, elektrownię z licznymi generatorami można zastąpić idealnym źródłem napięcia, a na przykład stację sieciową w obliczeniach tych zastępuje się jednym węzłem - punktem o takim samym potencjale. Z kolei przy obliczaniu prądów zwarciovych w sieci elektrownia musi być zastąpiona źródłem napięcia o pewnej wartości impedancji wewnętrznej.

## 2. Metody rozwiązywania trójfazowych obwodów elektrycznych prądu przemiennego

W dalszej części wykładów zajmować będziemy się siecią przesyłową, a więc układem linii i transformatorów (autotransformatorów) pracujących na napięciu 400 kV, 200 kV i 110 kV. Ponieważ sieć tych urządzeń jest siecią zamkniętą, toteż do wyznaczania stanu elektrycznego takiego układu są stosowane metody z teorii obwodów elektrycznych z zakresu analizy trójfazowych, wielokrotnie zamkniętych obwodów elektrycznych prądu przemiennego. Przy czym obwód wielokrotnie zamknięty oznacza, że przesył energii elektrycznej z jednego punktu sieci do innego może odbywać się wieloma połączeniami elektrycznymi.

Zatem należy pamiętać, że:

1. Ze względu na to iż mamy do czynienia z siecią prądu przemiennego należy stosować rachunek *liczb zespolonych* co oznacza iż w każdym punkcie obwodu elektrycznego sieci prądu przemiennego stan elektryczny jest jednoznacznie określony przez cztery wielkości:

moduł i kąt fazowy napięcia oraz moc czynną i bierną:  $U$ ,  $\delta$ ,  $P$ ,  $Q$ . Pozostałe wielkości elektryczne (np. prąd czynny, bierny,  $\cos\phi$ ) łatwo mogą być obliczone na podstawie tych wielkości elektrycznych. W dalszej części wykładu liczby zespolone będą wyróżniane przez podkreślenie:  $\underline{U} = U e^{j\delta} = e+jf$ ,  $\underline{S} = P+jQ$ ,  $\underline{I} = a+jb$ ,  $\underline{Z} = R+jX$ .

2. W elektroenergetycznych układach przesyłowych jednostkowe moce wytwarzane i przesyłane są rzędu kilkuset megawatów, toteż w obliczeniach, wielkości elektryczne wyraża się: moce w MV·A, MW, Mvar; napięcia w kV; prądy w kA; impedancje w  $\Omega$ ; admitancje w S (siemensach). Wtedy nie trzeba stosować przeliczników typu  $10^3$ , czy  $10^{-6}$ .
3. Mamy do czynienia z obwodami trójfazowymi, toteż napięcia zwykle są napięciami międzyprzewodowymi (międzyfazowymi) - jeśli wyraźnie tego nie zaznaczono iż są to wartości fazowe. Moce są mocami całkowitymi - sumą mocy we wszystkich trzech fazach. Prądy mierzone w sieci są wyłącznie prądami poszczególnych faz, natomiast w obliczeniach stosuje się w sposób sztuczny wartości prądów fazowych pomnożone przez  $\sqrt{3}$ . Zatem należy pamiętać, że w niektórych wzorach obliczeniowych występuje  $\sqrt{3}$ , a w innych nie występuje.
4. Generatory, linie, transformatory i inne urządzenia elektryczne muszą być odwzorowywane parametrami *impedancyjnymi*  $\underline{Z} = R + jX$ , czyli każdy taki element ma: rezystancję, reaktancję oraz pojemność.
5. Do rozwiązywania stanów elektrycznych w obwodach trójfazowych używa się metody składowych symetrycznych, zwłaszcza do analizy stanów asymetrycznych, na przykład do wyznaczania wartości prądów i napięć podczas zwarć niesymetrycznych, (jednofazowych). W stanach symetrycznych obwodu trójfazowego występuje tylko składowa zgodna, będąca odpowiednikiem stanu w jednej (dowolnej) fazie. Zatem przy rozwiązywaniu stanów symetrycznych używa się schematu jednofazowego elementów jak i całej sieci, natomiast do rozwiązywania stanów asymetrycznych (zwarć jednofazowych i dwufazowych) należy sporządzić trzy schematy – dla składowej zgodnej, przeciwnej i zerowej (metoda składowych symetrycznych).
6. W obliczeniach elektroenergetycznych związanych z wyznaczaniem stanów elektrycznych sieci zamkniętych jest używana metoda napięć węzłowych. W metodzie węzłowej operuje się prądami i napięciami węzłowymi.
7. Prądy węzłowe to ‘zastrzyki’ prądowe od źródeł (generatorów) wynikające z wstrzykiwanej do sieci mocy oraz ujemne zastrzyki prądowe wynikające z mocy odbieranej od sieci elektroenergetycznej - w modelu jak **Błąd! Nie można odnaleźć źródła odwołania.** Wynikają one z przepływów mocy na transformatorach blokowych (generacje) i transformatorach 110 kV/SN (odbior). Napięcia węzłowe to wartości napięć na szynach stacji elektroenergetycznych (elektrownianych i sieciowych) - szynach stacyjnych o różnych potencjałach elektrycznych. Napięcia wyraża się w kV, a prądy w kA (oczywiście są to liczby

zespolone). Prądy i napięcia węzłowe przedstawia się w postaci macierzy kolumnowych stopnia  $N \times 1$ , przy czym  $N$  jest liczbą węzłów schematu zastępczego sieci przesyłowej:

Między napięciami węzłowymi  $\underline{U}$ , a prądami węzłowymi  $\underline{I}$ , zgodnie z metodą napięć węzłowych, zachodzi relacja (prawo Ohma dla sieci wielowęzłowej):

$$\underline{I} = \underline{Y} \cdot \underline{U} \quad (2.1)$$

gdzie  $\underline{Y}$  jest macierzą admitancyjną węzłową o wymiarach  $N \times N$ , czyli ma tyle samo kolumn i wierszy co węzłów w schemacie zastępczym sieci. Zatem można powiedzieć, że każdej kolumnie lub wierszowi macierzy admitancyjnej odpowiada węzeł w schemacie zastępczym sieci. Obliczanie elementów macierzy admitancyjnej węzłowej jest stosunkowo proste. W macierzy tej występują elementy diagonalne, nazywane admitancjami własnymi węzłów, które oblicza się jako sumę wszystkich admitancji gałęzi dołączonych do danego węzła. Macierz admitancyjna jest macierzą symetryczną, a elementy pozadiagonalne nazywane są admitancjami wzajemnymi węzłów i są równe admitancjom gałęzi wziętych z przeciwnym znakiem - gałęzi łączących bezpośrednio dwa węzły. Węzły nie połączone bezpośrednio dwiema gałęziami mają zerowe admitancje wzajemne. Z równania metody potencjałów węzłowych wynikają równania napięciowo - mocowe:

$$P_i = U_i^2 Y_{ii} \sin \mu_{ii} + \sum_{j \in N_i} Y_{ij} U_i U_j \sin(\delta_i - \delta_j - \mu_{ij})$$

$$Q_i = U_i^2 Y_{ii} \cos \mu_{ii} - \sum_{j \in N_i} Y_{ij} U_i U_j \cos(\delta_i - \delta_j - \mu_{ij})$$

8. Elektroenergetyczna sieć przesyłowa jest siecią wielonapięciową, dlatego też konieczne jest „sprawdzenie” prądów, napięć i impedancji do jednego poziomu napięciowego. Można to dokonać poprzez specyficzne obliczanie elementów macierzy admitancyjnej uwzględniające przekładnie transformatorów.
9. W obliczeniach stanów elektroenergetycznej sieci przesyłowej używa się następujących matematycznych metod numerycznych
  - rachunek macierzowy,
  - metody rozwiązywania liniowych układów równań,
  - metody rozwiązywania nieliniowych układów równań,
  - metody całkowania numerycznego.
10. W obliczeniach stanów elektroenergetycznej sieci przesyłowej używa się następujących matematycznych metod numerycznych
  - rachunek macierzowy,
  - metody rozwiązywania liniowych układów równań,
  - metody rozwiązywania nieliniowych układów równań,
  - metody całkowania numerycznego równania ruchu obrotowego:

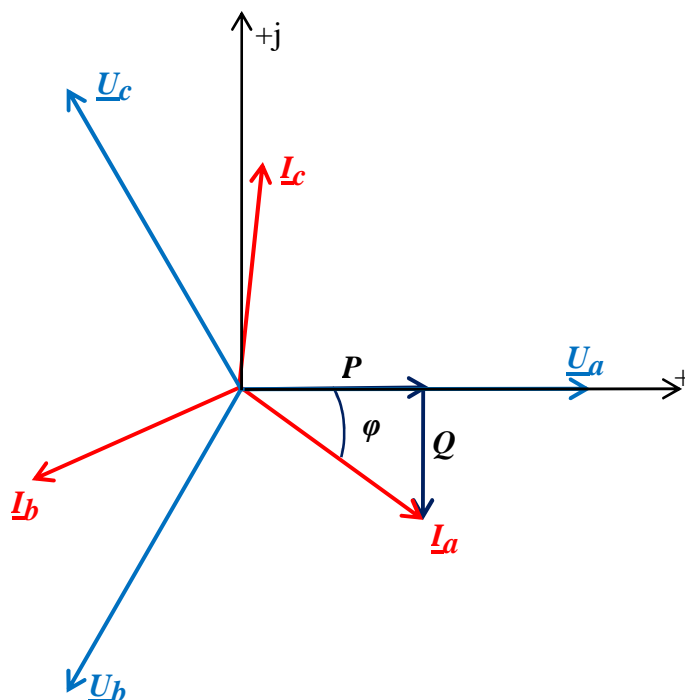
$$J \frac{d^2 \Omega}{dt^2} = M_n - M_h - R \frac{d\Omega}{dt}$$



- transmitancja operatorowa.

### 3. Praca układów trójfazowych

#### 3.1. W stanie symetrycznego obciążenia o charakterze indukcyjnym



Rys. 3.1. Wektory prądów i napięć w symetrycznym stanie obciążenia

Prądy fazowe w trójfazowym symetrycznym stanie obciążenia są:

w fazie a:  $\underline{I}_a = \underline{I} = c + jb$

w fazie b:  $\underline{I}_b = \underline{I} \cdot \underline{a}^2 = I \cdot \left( -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right)$  w fazie c:  $\underline{I}_c = \underline{I} \cdot \underline{a} = I \cdot \left( -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right)$

gdzie:

$$\underline{a} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad \underline{a}^2 = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}$$

Zatem wektorowo:

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_a \\ \underline{I}_b \\ \underline{I}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{I} \\ \underline{I} \cdot \underline{a}^2 \\ \underline{I} \cdot \underline{a} \end{bmatrix} = \underline{I} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ \underline{a}^2 \\ \underline{a} \end{bmatrix} \quad \text{podobnie napięcia:} \quad \begin{bmatrix} \underline{U}_a \\ \underline{U}_b \\ \underline{U}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{U} \\ \underline{U} \cdot \underline{a}^2 \\ \underline{U} \cdot \underline{a} \end{bmatrix} = \underline{U} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ \underline{a}^2 \\ \underline{a} \end{bmatrix}$$

W składowych symetrycznych:

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_0 \\ \underline{I}_1 \\ \underline{I}_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \end{bmatrix} \underline{I} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ \underline{a} \\ \underline{a}^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \underline{I} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \underline{I}_a \\ 0 \end{bmatrix}$$

podobnie napięcia są:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_0 \\ \underline{U}_1 \\ \underline{U}_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \end{bmatrix} \underline{U} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ \underline{a} \\ \underline{a}^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \underline{U} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \underline{U}_a \\ 0 \end{bmatrix}$$

**Trójfazowy układ prądów i napięć w stanie symetrycznym jest równoważny jednofazowemu układowi (składowej zgodnej – fazie a):**

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_a \\ \underline{U}_b \\ \underline{U}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{Z} & \underline{M} & \underline{M} \\ \underline{M} & \underline{Z} & \underline{M} \\ \underline{M} & \underline{M} & \underline{Z} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{I}_a \\ \underline{I}_b \\ \underline{I}_c \end{bmatrix} \quad \leftrightarrow \quad \underline{U}_a = \underline{Z}_1 \cdot \underline{I}_a$$

Moc trójfazowa czynna i bierna jest:

$$\underline{S} = P + jQ = 3 \cdot \underline{U}_{fa} \cdot \underline{I}_a^* = \sqrt{3} \cdot \underline{U}_a \cdot \underline{I}_a^*$$

a moc pozorna:

$$|S| = \sqrt{P^2 + Q^2} = 3 \cdot |\underline{U}_{fa}| \cdot |\underline{I}_a| = \sqrt{3} \cdot |\underline{U}_a| \cdot |\underline{I}_a|$$

Należy zauważyć, że:

$$\underline{a} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad \underline{a}^2 = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}$$

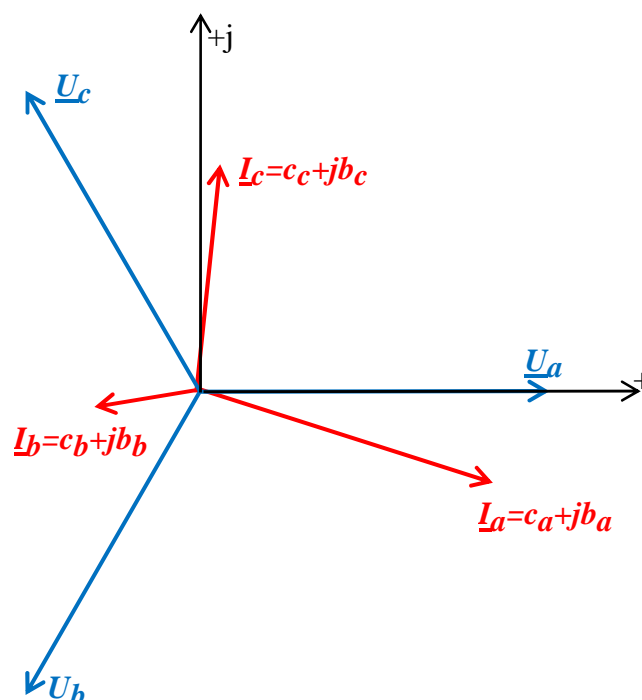
stąd:

$$1 + \underline{a} + \underline{a}^2 = 0,$$

a macierze przekształcenia składowych symetrycznych są:

$$\underline{S} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \end{bmatrix} \quad \underline{S}^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \end{bmatrix}$$

## 3.2. W stanie niesymetrycznego obciążenia



Rys. 3.2. Wektory prądów i napięć w niesymetrycznym stanie obciążenia

Prądy fazowe w trójfazowym asymetrycznym stanie obciążenia są:

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_a \\ \underline{I}_b \\ \underline{I}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_a + jb_a \\ c_b + jb_b \\ c_c + jb_c \end{bmatrix}$$

W składowych symetrycznych:

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_0 \\ \underline{I}_1 \\ \underline{I}_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} c_a + jb_a \\ c_b + jb_b \\ c_c + jb_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \neq 0 \\ \neq 0 \\ \neq 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_a \\ \underline{U}_b \\ \underline{U}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{Z} & \underline{M} & \underline{M} \\ \underline{M} & \underline{Z} & \underline{M} \\ \underline{M} & \underline{M} & \underline{Z} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{I}_a \\ \underline{I}_b \\ \underline{I}_c \end{bmatrix} \quad \leftrightarrow \quad \begin{aligned} \underline{U}_0 &= \underline{Z}_0 \cdot \underline{I}_0 \\ \underline{U}_1 &= \underline{Z}_1 \cdot \underline{I}_1 \\ \underline{U}_2 &= \underline{Z}_2 \cdot \underline{I}_2 \end{aligned}$$

**Trójfazowy układ prądów i napięć w stanie niesymetrycznego obciążenia jest równoważny trzem jednofazowym układom – dla składowej zerowej, zgodnej i przeciwnej.**