



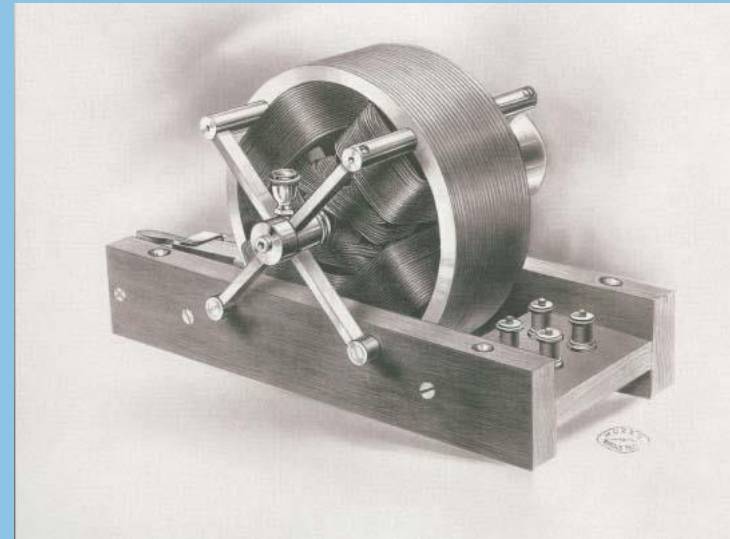
Анализа електроенергетских система 1 -увод-

Историјат електроенергетских система

- **1872.** – Први електрични генератор једносмерне струје. (Gramme)
- **1882.** – Осветљење дела Њујорка на једносмерном напону 110 V. (Edison)
- **1888.** – Теслин патент: вишефазни индукциони мотор.

Предности АС система:

- Трансформација
- Синхрони генератори су једноставнији
- АС мотори су једноставнији и јефтинији



Један од оригиналних Теслиних мотора из 1888.

- Све до **1900.** коришћене су различите фреквенције од 25 Hz до 133 Hz.

Данас се користе следеће фреквенције: 50 Hz у Европи

60 Hz у САД

и 50 и 60 Hz у Јапану

- **1891.** – Први наизменични пренос на велику удаљеност. (Немачка, од хидроелектране у Лауфену до Франкфурта на Мајни, на напону од 12 kV на растојање од 179 km)
- **1895.** – Прва хидроелектрана велике снаге на реци Нијагари, снаге 3700 kW, на напону од 2400 V.
- **1914.** – Уведен преносни напон од 110 kV у Немачкој.
- **1920.-их** – Почиње интеграција ЕЕС-а каквих данас знамо, која још увек траје.
- **1952.** – Напонски ниво од 400 kV (Шведска), а касније и напонски нивои од 500 kV (СССР) и 735 kV (Канада).
- **1954.** – Развој водова једносмерног напона HVDC (High Voltage DC), каблом дугим 100 km, на напону од 100 kV повезано острво Готланд у Балтичком мору са шведским копном. Данас се користе и водови једносмерног напона 800 kV.

Историјат ЕЕС-а у Србији

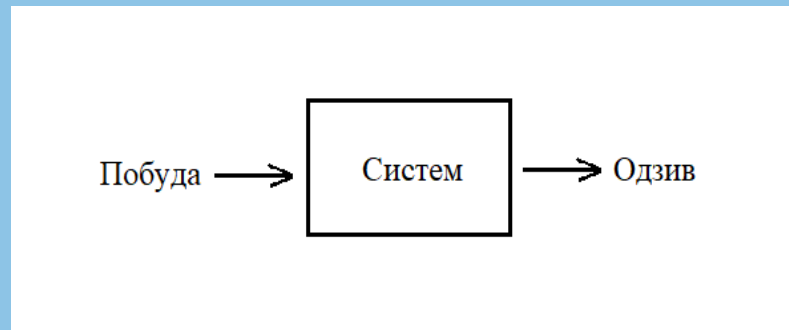
- **1880.** – По први пут у Србији употребљена електрична енергија, у Београду, у кафани „Хамбург” упаљена прва електрична сијалица.
- **1893.** – Прва термоелектрана, у Београду, на једносмерном напону, и наша престоница бива осветљена међу првим градовима у Европи.
- **1899.** – Електрификационо Ваљево са ХЕ на реци Градац, са ДС генераторима.
- **1900.** – Прва индустријска ХЕ, у Ужицу, на реци Ђетињи.
- **1903.** – ХЕ на реци Вучјанки, у Лесковцу.
- **1909.** – ХЕ на Нишави и Гамзиград код Зајечара.
- **Крајем 1950.-их** – Нагли развој: Изграђени далеководи: 220 kV Подгорица – Србобран и 400 kV Београд – Ђердап.



Хидроелектрана на Ђетињи, у Ужицу

Данашњи напонски нивои у Србији: 400 kV, 220 kV, 110kV, 35 kV, 20 kV, 10 kV, 0.4 kV.

Анализа ЕЕС-а



Побуда: заједнички назив за све улазне величине.

Систем: Скуп свих међусобно повезаних елемената тако да чине целину.

Одзив: Величине које се појављују као реакција на присутну побуду.

А) Ако су познати побуда и систем, а непознат одзив => АНАЛИЗА

Б) Ако су познати побуда и одзив, а непознат систем => СИНТЕЗА

Аналитички методи:

- Анализа стационарних (баласнираних, симетричних) стања
- Анализа поремећених стања (кварови)
- Анализа динамике (стабилности) система

ЕЕС је највећи динамички систем који је људска рука направила. То је сложени систем велике димензионалности, чија је функција да сигурно, поуздано и економично снабдева потрошаче довољним количинама електричне енергије. Ови системи су физички велики, са растом интерконекција прелазе границе појединих држава и прерастају у континенталне системе.

За његов опис потребан је велики број једначина и неједначина.

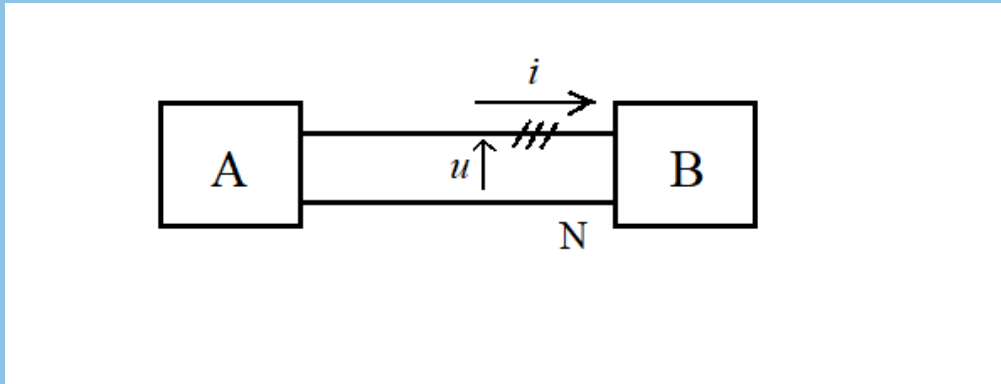
Да би ЕЕС исправно функционисао, неопходни су системи информација, управљања (и новчаних токова) који су, такође, сложени. Интеракција таквог система и околине је обично неизвесна (промена амбијенталних услова, утицај људских делатности (грађевински радови), животиња (птице)...) и треба наћи одговарајући начин да се моделује.

Декомпозиција:

- Просторна: Географско разграничење ЕЕС-а
- Временска: Раздвајање процеса према њиховој брзини
- Функционална: Раздвајање функција у ЕЕС-у:
 - Производња**
 - Пренос**
 - Дистрибуција**
 - Потрошња**

Елементи анализе електричних кола наизменичне струје (за стационарна стања)

У прорачунима стационарних стања, по правилу се претпоставља да се има потпуна симетрија у све три фазе наизменичног, трофазног система, па се из тих разлога може користити монофазна шема.



Трофазни симетрични систем

u, i – фазни напони и струје

$\omega = 2\pi f$, кружна учестаност

U_m, I_m амплитуде напона и струје

θ, β фазни ставови напона и струје

$$u_a = U_m \cos(\omega t + \theta)$$

$$i_a = I_m \cos(\omega t + \beta)$$

$$u_b = U_m \cos\left(\omega t + \theta - \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$i_b = I_m \cos\left(\omega t + \beta - \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$u_c = U_m \cos\left(\omega t + \theta + \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$i_c = I_m \cos\left(\omega t + \beta + \frac{2\pi}{3}\right)$$

Појам фазора

$$u(t) = \operatorname{Re}\{U_m \cos(\omega t + \theta) + jU_m \sin(\omega t + \theta)\}$$

$$u(t) = \operatorname{Re}\{U_m e^{j(\omega t + \theta)}\} = \sqrt{2} \operatorname{Re}\left\{\frac{U_m}{\sqrt{2}} e^{j\omega t} e^{j\theta}\right\} = \sqrt{2} \operatorname{Re}\{\underline{U} e^{j\omega t}\}$$

$$\underline{U} = \frac{U_m}{\sqrt{2}} e^{j\theta} = U \angle \theta$$

$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$, ефективна вредност за синусоидалне појаве

*Euler-ова формула: $e^{j\varphi} = \cos \varphi + j \sin \varphi$

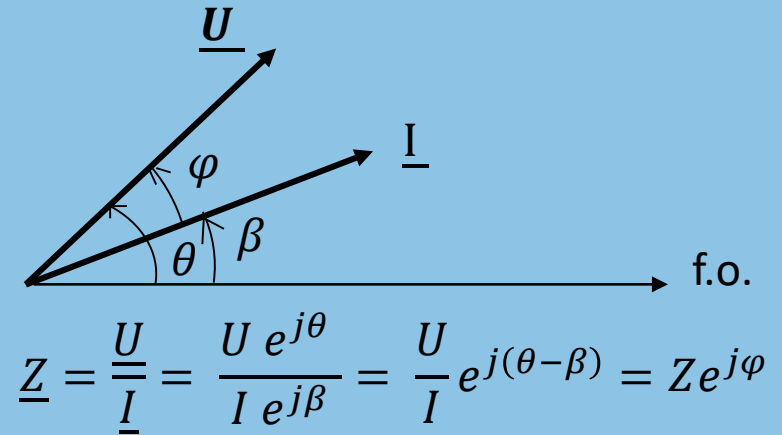
Пример:

$$u_a = \sqrt{2} \operatorname{Re}\{\underline{U}_a e^{j\omega t}\}$$

$$u_b = \sqrt{2} \operatorname{Re}\{\underline{U}_b e^{j\omega t}\}$$

$$u_{ab} = u_a - u_b = \sqrt{2} \operatorname{Re}\{(\underline{U}_a - \underline{U}_b) e^{j\omega t}\}$$

$$\underline{U}_{ab} = \underline{U}_a - \underline{U}_b$$



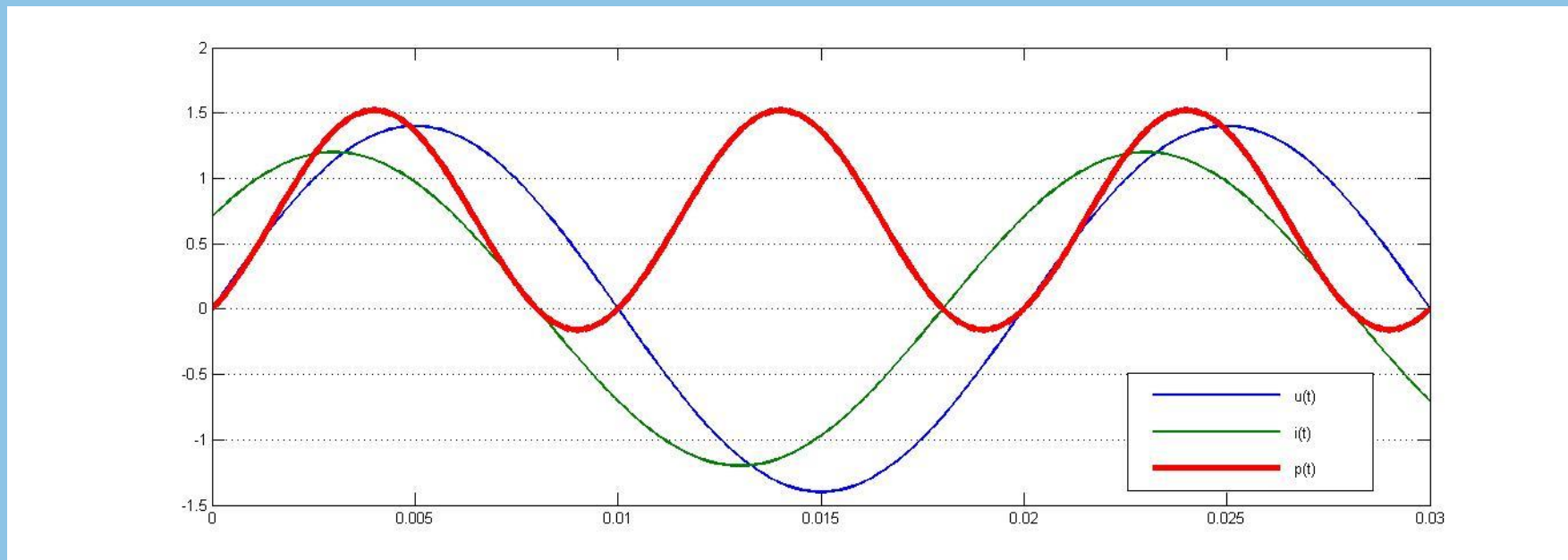
Kirchhoff-ови закони се могу дати за фазорске величине.

$$\sum \underline{I}_i = 0$$

$$\sum \underline{U}_i = 0$$

Снага у синусоиданим условима - монофазно

$$p(t) = u(t) * i(t) = U\sqrt{2} \cos(\omega t + \theta) * I\sqrt{2} \cos(\omega t + \beta)$$
$$p(t) = 2UI \frac{1}{2} [\cos(\omega t + \theta - \omega t - \beta) + \cos(\omega t + \theta + \omega t + \beta)]$$
$$p(t) = UI \cos\varphi + UI \cos(2\omega t + \theta + \beta)$$



Средња снага: $P_{sr} = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = UI \cos\varphi$

Снага у синусоиданим условима - трофазно

$$\begin{aligned} p(t) &= u_a i_a + u_b i_b + u_c i_c \\ p(t) &= U_m I_m \cos(\omega t + \theta) \cos(\omega t + \beta) + \\ &+ U_m I_m \cos\left(\omega t + \theta - \frac{2\pi}{3}\right) \cos\left(\omega t + \beta - \frac{2\pi}{3}\right) + \\ &+ U_m I_m \cos\left(\omega t + \theta + \frac{2\pi}{3}\right) \cos\left(\omega t + \beta + \frac{2\pi}{3}\right) = \\ &= U_m I_m \left[\frac{\cos\varphi + \cos(2\omega t + \theta + \beta)}{2} + \frac{\cos\varphi + \cos(2\omega t + \theta + \beta - \frac{4\pi}{3})}{2} + \frac{\cos\varphi + \cos(2\omega t + \theta + \beta + \frac{4\pi}{3})}{2} \right] \\ p(t) &= \frac{3}{2} U_m I_m \cos\varphi \end{aligned}$$

Средња снага: $P_{sr} = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = p(t) = \frac{3}{2} U_m I_m \cos\varphi$

$$U_f = U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \qquad I_f = I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$$

$$P = 3U_f I_f \cos\varphi$$

Закључак: Тренутна снага трофазног система је константна.

Ако је:

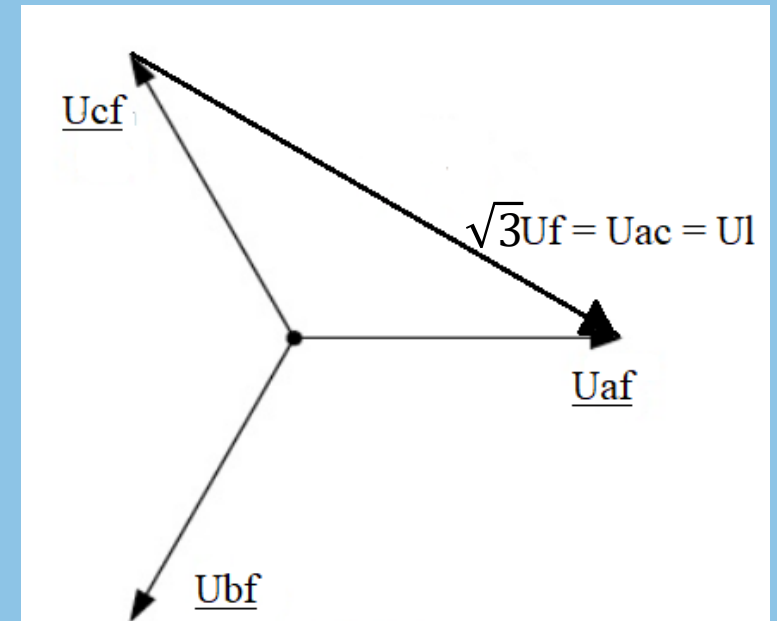
$$U_l = \sqrt{3}U_f$$

$$P = \sqrt{3}U_l I_f \cos\varphi$$

Ако још усвојимо:

$$I_l = \sqrt{3}I_f$$

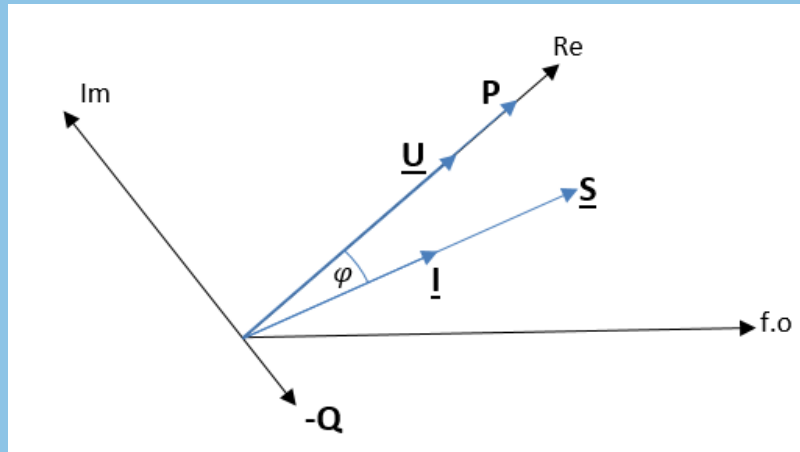
$$P = U_l I_l \cos\varphi$$



Преко фазора: $\underline{U} = U e^{j\theta}$ $\underline{I} = I e^{j\beta}$ $\theta - \beta = \varphi$

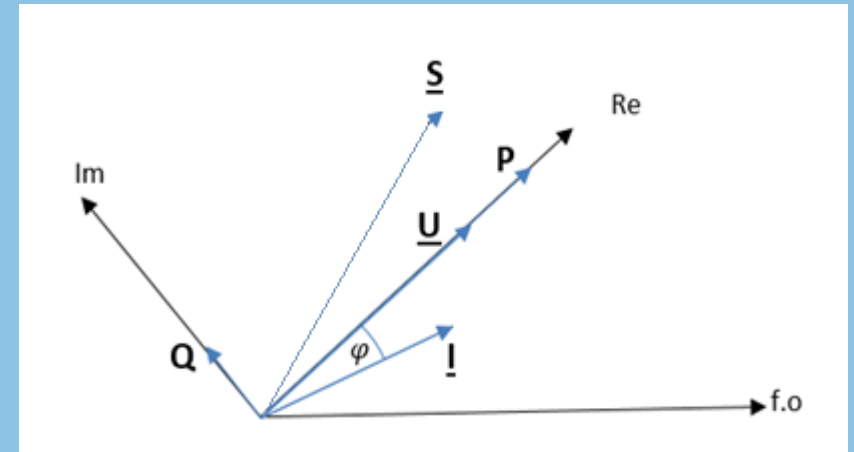
$$1. \underline{S} = \underline{U}^* \underline{I} = UI e^{j(-\theta + \beta)} = UI e^{-j\varphi} = P - jQ$$

$$P = \operatorname{Re}\{\underline{U}^* \underline{I}\} \quad Q = -\operatorname{Im}\{\underline{U}^* \underline{I}\}$$



$$2. \underline{S} = \underline{U} \underline{I}^* = UI e^{j(\theta - \beta)} = UI e^{j\varphi} = P + jQ$$

$$P = \operatorname{Re}\{\underline{U} \underline{I}^*\} \quad Q = \operatorname{Im}\{\underline{U} \underline{I}^*\}$$

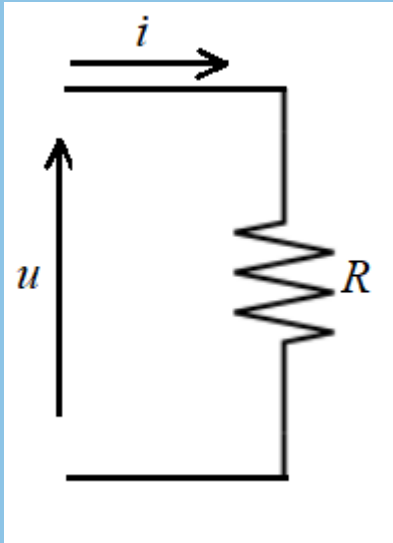


Инваријантни изрази за струју:

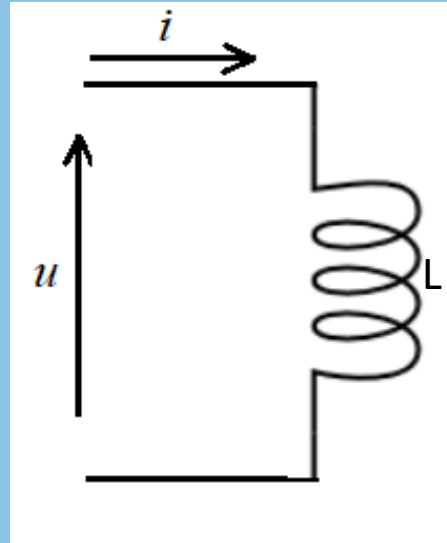
$$1. \underline{I} = \frac{\underline{S}}{\underline{U}^*} = \frac{P - jQ}{\underline{U}^*}$$

$$2. \underline{I} = \frac{\underline{S}^*}{\underline{U}} = \frac{P + jQ}{\underline{U}}$$

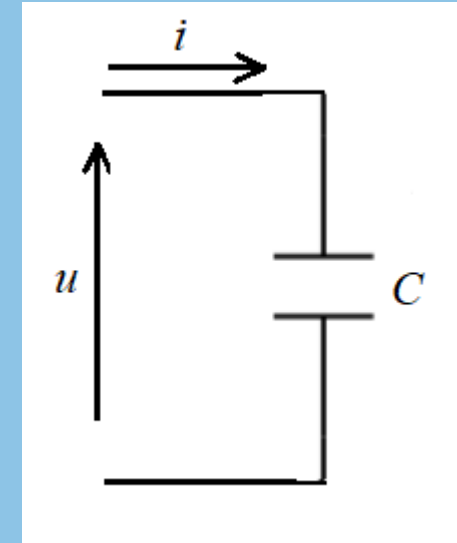
Импедансе пасивних елемената



$$u = Ri$$
$$\underline{U} = R\underline{I}$$



$$u = L \frac{di}{dt}$$
$$i = \sqrt{2} * \operatorname{Re}\{\underline{I} e^{j\omega t}\}$$
$$u = \sqrt{2} * \operatorname{Re}\{L\underline{I} \frac{de^{j\omega t}}{dt}\}$$
$$u = \sqrt{2} * \operatorname{Re}\{j\omega L\underline{I} e^{j\omega t}\}$$
$$\underline{U} = j\omega L\underline{I}$$



$$i = C \frac{du}{dt}$$
$$u = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^t i dt$$
$$\underline{U} = -j \frac{1}{\omega C} \underline{I}$$

Пример:

$$\underline{Z} = \frac{U}{\underline{I}} \quad \underline{Z}_L = j\omega L \quad \underline{Z}_C = \frac{1}{j\omega C}$$

$$\underline{Y} = \frac{1}{\underline{Z}} \quad \underline{Y}_L = \frac{1}{j\omega L} \quad \underline{Y}_C = j\omega C$$

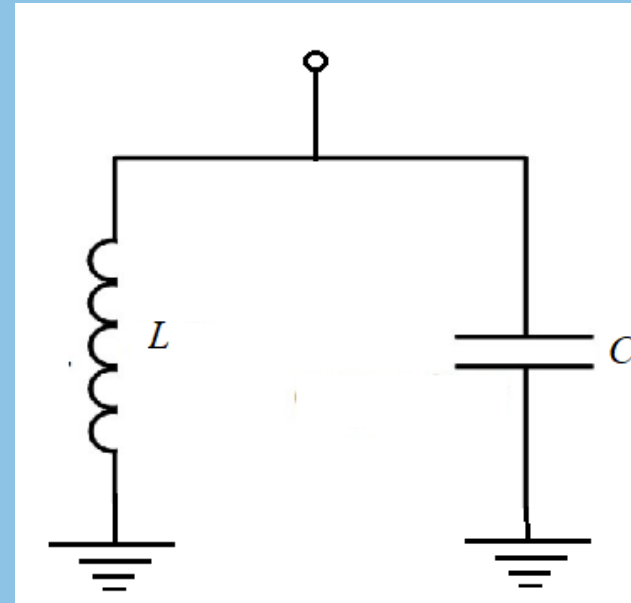
$$\underline{Z} = R + jX \quad \underline{Y} = G + jB$$

$$\underline{Y}_e = \underline{Y}_L + \underline{Y}_C = -j\frac{1}{\omega L} + j\omega C = j\left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right)$$

$$\underline{Y}_e = G_e + jB_e \quad (G_e \approx 0)$$

$$\underline{Z}_e = \frac{1}{\underline{Y}_e} R_e + jX_e = \frac{1}{G_e + jB_e} = -j\frac{1}{B_e}$$

$$X_e = -\frac{1}{B_e} = -\frac{1}{\omega C - \frac{1}{\omega L}} = \frac{\omega L}{1 - \omega^2 LC}$$



$$\underline{Z} = Ze^{j\varphi} = \frac{U}{I} e^{j\varphi}$$

$$\underline{S} = P + jQ = UIe^{j\varphi}$$

$$P = UI\cos\varphi$$

$$Q = UI\sin\varphi$$

Облик и начин повезивања електроенергетских мрежа

Облик и начин просторне повезаности елемената једне мреже зове се конфигурација (топологија) мреже.

Конфигурација мреже зависи од услова постављања мреже и врсте мреже.

- чворови мреже су сабирнице постројења
- гране су водови и трансформатори

Делови мреже различитих напонских нивоа повезани су **интерконективним трансформаторима**.

Генератори се прикључују на мрежу посредством **блок-трансформатора**.

Дистрибутивна мрежа се повезује посредством **дистрибутивних (потрошачких) трансформатора**.

Конфигурација мреже зависи од географског распореда потрошње и генератора. Не постоји идеална конфигурација.

Основна конфигурација зависи од улоге коју мрежа има у ЕЕС-у.

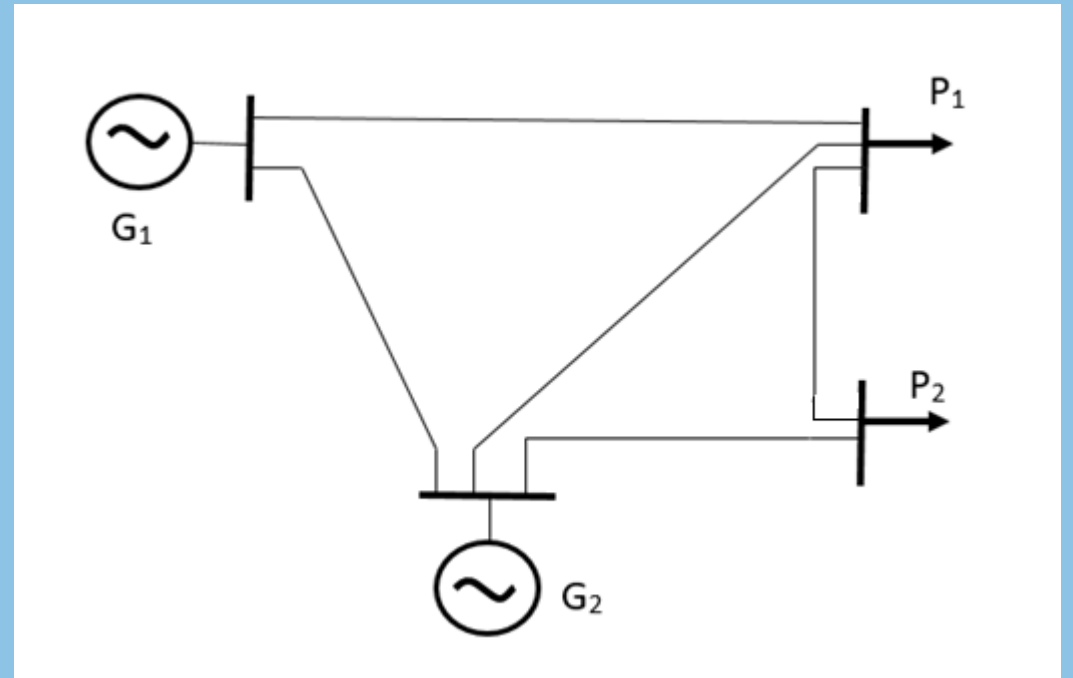
Основне конфигурације мрежа су:

A) Петља (Closed loop) :

Њоме се постиже

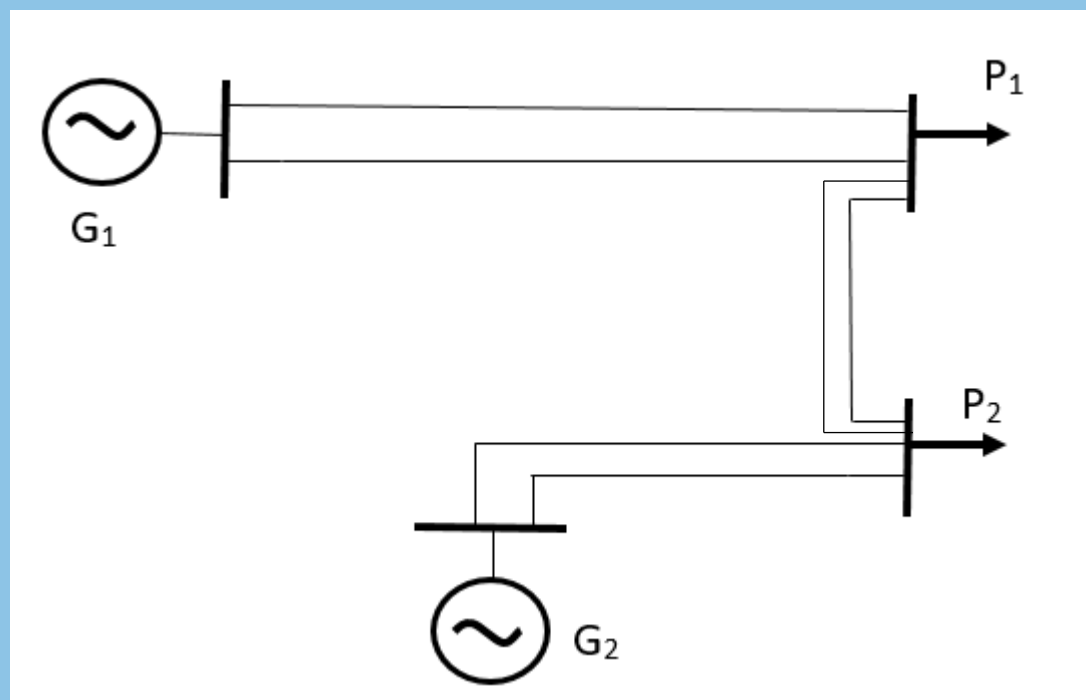
- Повезивање генератора:
поузданост
- Конфигурација мреже: сигурност

Може бити једна или више петљи.



Б) Кичма (Back bone)

Користи се када је постављање водова скупо, тада се праве двоструко вођени водови, или водови на већ коришћеним коридорима.



В) Радијална конфигурација

Да би се обезбедила сигурност напајања, ова конфигурација се реализује:

- или са отвореним петљама (напојни трансформатори су на истим сабирницама)
- или са два извора (трансформатори на различитим сабирницама)

