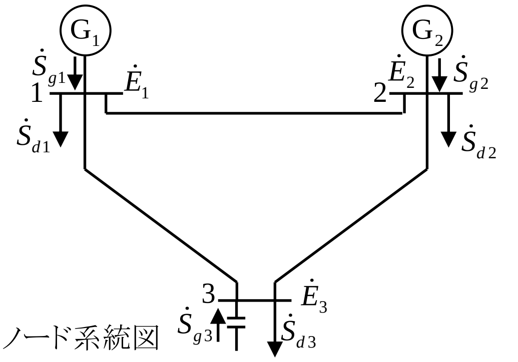
3.5 潮流計算

電力系統の表し方

- 単相等価回路（平衡三相回路を単相で扱い三相に拡張）
- 単線結線図（電力系統の要素間接続関係を表現）
- 単位法（理想変圧器要素を除外，各部の電圧値を約 1.0pu で表現→異常値の検出）
- 電力円線図（2 変電所間（送受電端間）の電力の流れ）
- 電力（回路網）方程式：ノードとブランチで表現

電力方程式

- 電力潮流：電力の流れ
- 母線（ブス）：電力潮流を切り換える線
- ノード：回路の分岐点
  発電機，負荷，調相設備（電力用コンデンサ，分路リアクトル，など）
- ブランチ：2箇所のノード間の接続要素
  送電線（π 形等価回路で表現）
  変圧器（理想変圧器で表せない場合）



3 ノード系統図

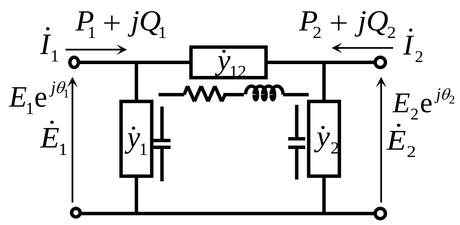
2 ノード系の電力方程式

$$\dot{I}_1 = \dot{y}_1\dot{E}_1 + \dot{y}_{12}(\dot{E}_1 - \dot{E}_2)$$
$$\dot{I}_2 = \dot{y}_{12}(\dot{E}_2 - \dot{E}_1) + \dot{y}_2\dot{E}_2$$

ここで，$\dot{Y}_{11} = \dot{y}_1 + \dot{y}_{12}$，$\dot{Y}_{22} = \dot{y}_2 + \dot{y}_{12}$，$\dot{Y}_{12} = \dot{Y}_{21} = -\dot{y}_{12}$
と置き換えると以下のノード方程式が得られる。

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{Y}_{11} & \dot{Y}_{12} \\ \dot{Y}_{21} & \dot{Y}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{E}_1 \\ \dot{E}_2 \end{bmatrix}$$

$\dot{Y}_{11}$：ノード 1 の駆動点アドミタンス（アドミタンスの和）
$\dot{Y}_{12}$：ノード 1-2 間の伝達アドミタンス（負の符号）



ノード 1　　ノード 2

※矢印の向きに注意
（ノード 1,2 に発電機があり両者が送電線で結ばれている状態）

ノード 1，2における電力は次のように表す。

$$\dot{S}_1 = P_1 + jQ_1 = \dot{E}_1\bar{I}_1 = \dot{E}_1\overline{(Y_{11}E_1 + Y_{12}E_2)}$$
$$= \bar{Y}_{11}E_1{}^2 + \bar{Y}_{12}\dot{E}_1\bar{E}_2$$
$$\dot{S}_2 = P_2 + jQ_2 = \dot{E}_2\bar{I}_2 = \bar{Y}_{21}\bar{E}_1\dot{E}_2 + \bar{Y}_{22}E_2{}^2$$

$$\dot{Y}_{11} = Y_{11}\,e^{j\varphi_{11}},\quad \dot{Y}_{22} = Y_{22}\,e^{j\varphi_{22}}$$
$$\dot{Y}_{12} = Y_{12}\,e^{j\varphi_{12}},\quad \dot{Y}_{21} = Y_{21}\,e^{j\varphi_{21}}$$
$$\dot{E}_1 = E_1\,e^{j\theta_1},\quad \dot{E}_2 = E_2\,e^{j\theta_2}$$
，と変換
$$\theta_1 - \theta_2 = \theta_{12},\ \theta_2 - \theta_1 = \theta_{21}$$

$$P_1 + jQ_1$$
$$= Y_{11}E_1{}^2\exp(-j\varphi_{11}) + Y_{12}E_1E_2\exp j(\theta_{12} - \varphi_{12})$$
$$P_2 + \mathrm{j}Q_2$$
$$= Y_{21}E_1E_2\exp j(\theta_{21} - \varphi_{21}) + Y_{22}E_2{}^2\exp(-j\varphi_{22})$$

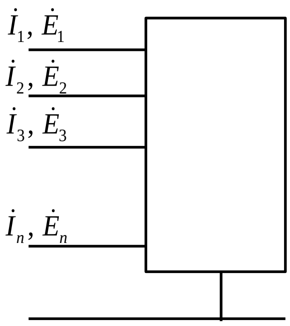
$$\boxed{\begin{aligned} P_1 &= Y_{11}E_1{}^2\cos\varphi_{11} + Y_{12}E_1E_2\cos(\theta_{12} - \varphi_{12}) \\ Q_1 &= -Y_{11}E_1{}^2\sin\varphi_{11} + Y_{12}E_1E_2\sin(\theta_{12} - \varphi_{12}) \\ P_2 &= Y_{22}E_2{}^2\cos\varphi_{22} + Y_{21}E_1E_2\cos(\theta_{21} - \varphi_{21}) \\ Q_2 &= -Y_{22}E_2{}^2\sin\varphi_{22} + Y_{21}E_1E_2\sin(\theta_{21} - \varphi_{21}) \end{aligned}}$$

以上から，有効電力と無効電力に分けて，2 ノード系統の電力方程式（右枠内）が得られる。

変数は両ノードの，P，Q，E，θ で 8 個，方程式は4個なので，4変数を指定すると他が定まる。

多ノード系統の電力方程式

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \\ \vdots \\ \dot{I}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{Y}_{11} & \dot{Y}_{11} & \cdots & \dot{Y}_{11} \\ \dot{Y}_{11} & \dot{Y}_{11} & \cdots & \dot{Y}_{11} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ \dot{Y}_{11} & \dot{Y}_{11} & \cdots & \dot{Y}_{11} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{E}_1 \\ \dot{E}_2 \\ \vdots \\ \dot{E}_n \end{bmatrix}$$



直流法：

送電損失と無効電力の分布を無視し，有効電力の分布と書くノード電圧の相差角分布を求める

簡単のため駆動点アドミタンス$\dot{Y}_{ii} = 0$で，ノード1-2間のインピーダンスのみを考える。P_1は

$$P_1 = Y_{11}E_1^{\ 2}\cos\varphi_{11} + Y_{12}E_1E_2\cos(\theta_{12} - \varphi_{12})$$
$$= Y_{12}E_1E_2\left\{\cos\theta_{12}\cos\varphi_{12} + \sin\theta_{12}\sin\varphi_{12}\right\}$$

ここで，ノード1，2の電圧位相角の差：θ_{12}は小でとする。$\dot{Y}_{11} = y_{12} = R_{12} + jX_{12}$であり，ノード 1-2間の抵抗$R \ll X$の場合は，

$\sin\theta_{12} \simeq \theta_{12}$，$\cos\theta_{12} \simeq 1$

$\varphi_{12} = \tan^{-1}\dfrac{X_{12}}{R_{12}} \rightarrow \varphi_{12} = \dfrac{\pi}{2}$より

$$P_1 \simeq Y_{12}E_1E_2\left(1\cdot 0 + \theta_{12}\cdot 1\right) = Y_{12}E_1E_2\theta_{12},$$

$Y_{12} = 1/X_{12}$だから，

$$P_1 \simeq \frac{\theta_1 - \theta_2}{X_{12}}E_1E_2,$$

また，電圧は 10%以内に制御されるので$E_1 = E_2 = 1\,\mathrm{pu}$ とすれば一般化して，

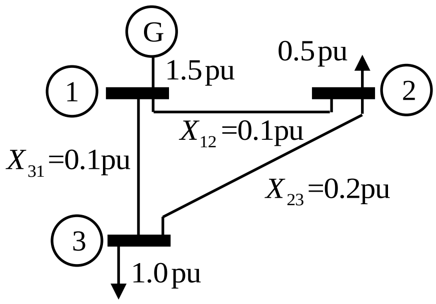
$$P_{ij} \simeq \frac{\theta_i - \theta_j}{X_{ij}}, \text{ または，} \boxed{\theta_i - \theta_j = X_{ij}P_{ij}}$$

オームの法則 $V = RI$ と対比し，

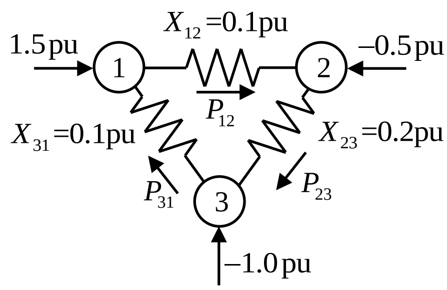
$\theta_{\mathrm{ij}} \rightarrow V,\ X_{\mathrm{ij}} \rightarrow R,\ P_{\mathrm{i}} \rightarrow I$ すると，θ, Pの関係を直流回路で解くことができる。（直流計算法，フロー直流法という）

また，系統の抵抗分は無視したので電力損失は無く，$\sum_{i=1}^{n} P_i = 0$である。

直流計算法による電力潮流計算



簡略化した等価回路は



- 各ノードの電力潮流の和＝0
- ループ1周の相差角の和＝0

図で，$E_1 = E_2 = 1\,\mathrm{pu}$ とし，各ブランチの潮流とノード1-2間の電圧位相角の差を求めよ。

$$\begin{aligned} &1.5 - P_{12} + P_{31} = 0 \\ &P_{12} - 0.5 - P_{23} = 0 \\ &P_{23} - 1.0 - P_{31} = 0 \end{aligned} \quad \text{より，} \quad \begin{aligned} P_{31} &= P_{12} - 1.5 \\ P_{23} &= P_{12} - 0.5 \end{aligned}$$

$$\theta_{12} = \left(\theta_1 - \theta_2\right) = 0.1 \times P_{12}$$

$$\theta_{23} = \left(\theta_2 - \theta_3\right) = 0.2 \times P_{23}$$

$\theta_{31} = \left(\theta_3 - \theta_1\right) = 0.1 \times P_{31}$ 和を取ると左辺＝0

$$0 = 0.1 \times P_{12} + 0.2 \times P_{23} + 0.1 \times P_{31}$$

$$= 0.1 \times P_{12} + 0.2 \times (P_{12} - 0.5) + 0.1 \times (P_{12} - 1.5)$$

よって，

$P_{12} = 0.625\,\mathrm{pu}$，$P_{31} = -0.875\,\mathrm{pu}$，$P_{23} = 0.125\,\mathrm{pu}$，

また，$\theta_{12} = \left(\theta_1 - \theta_2\right) = 0.1 \times P_{12}$ より

$$\theta_1 - \theta_2 = P_{12} \times X_{12} = 0.0625\,\mathrm{rad}$$

3.6 電力系統の周波数制御

電力需要と供給の関係（1 台の発電機）

$$P_M = P_E + M\frac{df}{dt}$$

ここで，P_M：蒸気タービンなどの回転力，P_E：発電機の電気出力，M：慣性定数，f：周波数，df/dt：回転子の加速度，P_E は負荷で消費される電力と送配電ネットワークの抵抗分で消費される電力損失の和。

需要と供給の差と周波数変化

$P_M > P_E$（供給過剰），f：上昇

$P_M = P_E$（供給過剰），f：一定

$P_M < P_E$（供給過剰），f：下降

・負荷周波数特性 $\dfrac{\Delta P_L}{\Delta f} = -K_L$ (1)

ΔP_L：負荷変化量[MW]，Δf：周波数偏差[Hz]，K_L 負荷周波数特性定数[MW/Hz]

通常 K_L =0.03～0.06 [MW/Hz]・発電機周波数特性 $\dfrac{\Delta P_G}{\Delta f} = K_G$ (2)

ΔP_G：発電機の出力変化量[MW]，Δf：周波数偏差[Hz]，K_G 発電機周波数特性定数[MW/Hz]

通常 K_G =0.07～0.14 [MW/Hz]

・系統周波数特性

系統内の電力不均衡は ΔP_G と ΔP_L からなる電力不均衡量 ΔP

$$\Delta P = \Delta P_G - \Delta P_L \quad (3)$$

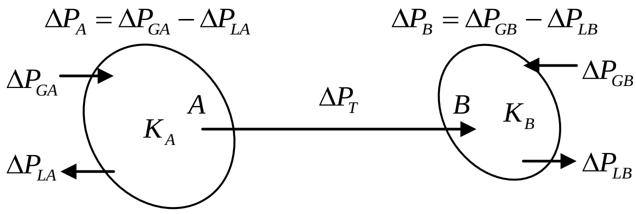
(3)に(1)(2)を代入して，系統周波数特性は

$$\frac{\Delta P}{\Delta f} = \frac{\Delta P_G}{\Delta f} - \frac{\Delta P_L}{\Delta f} = K_G + K_L = K \quad (4)$$

となる。通常 K =0.1～0.2 [MW/Hz]

連携系統の電力周波数特性

電力系統 A, B が連携線を介して連携している。A, B で電力不均衡が生じて，A から B へ ΔP_T：連携線潮流偏差，分だけ電力が送られ，系統周波数偏差 Δf が生じたとする。



(4)より

系統 A: $\Delta f = \dfrac{\Delta P_A - \Delta P_T}{K_A} = \dfrac{\Delta P_{GA} - \Delta P_{LA} - \Delta P_T}{K_A}$

系統 B: $\Delta f = \dfrac{\Delta P_B + \Delta P_T}{K_B} = \dfrac{\Delta P_{GB} - \Delta P_{LB} + \Delta P_T}{K_B}$

これらから，

$$\Delta P_T = \frac{K_B(\Delta P_{GA} - \Delta P_{LA}) - K_A(\Delta P_{GB} - \Delta P_{LB})}{K_A + K_B} \quad (5)$$

$$\Delta f = \frac{(\Delta P_{GA} - \Delta P_{LA}) + (\Delta P_{GB} - \Delta P_{LB})}{K_A + K_B} \quad (6)$$

ここで，ΔP_A，ΔP_B：地域 A, B の電力不均衡量

ΔP_{GA}，ΔP_{GB}：地域 A, B の発電機出力変化量

ΔP_{LA}，ΔP_{LB}：地域 A, B の負荷変化量

K_A，K_B：地域 A, B の系統周波数特性定数