

第9回の内容

- ・ 電力方程式
- ・ 電力潮流計算
- ・ 電力系統の周波数制御

3.8 電力方程式

3 ノード(バス)系統図と用語

- ・ 電力潮流: 電力の流れ
- ・ 母線(バス): 電力潮流を切り換える線
- ・ ノード: 回路の分岐点, 発電機, 変圧器, 送電線などが接続される
- ・ ブランチ: 2箇所のノードを結ぶもの

2 ノード系の電力方程式

$$\dot{I}_1 = \dot{y}_{11}\dot{E}_1 + \dot{y}_{12}(\dot{E}_1 - \dot{E}_2)$$

$$\dot{I}_2 = \dot{y}_{12}(\dot{E}_2 - \dot{E}_1) + \dot{y}_{22}\dot{E}_2$$

ここで, $\dot{Y}_{11} = \dot{y}_{11} + \dot{y}_{12}$, $\dot{Y}_{22} = \dot{y}_{22} + \dot{y}_{12}$

$$\dot{Y}_{12} = \dot{Y}_{21} = -\dot{y}_{12}$$

と置き換えると

$$\dot{I}_1 = \dot{Y}_{11}\dot{E}_1 + \dot{Y}_{12}\dot{E}_2$$

$$\dot{I}_2 = \dot{Y}_{21}\dot{E}_1 + \dot{Y}_{22}\dot{E}_2$$

$\dot{Y}_{11}$: ノード 1 における駆動点アドミタンス

$\dot{Y}_{22}$: ノード 1-2 間の伝達アドミタンス

ノード 1 における電力は

$$\dot{S}_1 = P_1 + jQ_1 = \dot{E}_1 \bar{I}_1 = \dot{E}_1 (\bar{Y}_{11}\dot{E}_1 + \bar{Y}_{12}\dot{E}_2)$$

$$= \bar{Y}_{11}\dot{E}_1^2 + \bar{Y}_{12}\dot{E}_1\dot{E}_2$$

$$\dot{S}_2 = P_2 + jQ_2 = \dot{E}_2 \bar{I}_2 = \bar{Y}_{21}\dot{E}_1\dot{E}_2 + \bar{Y}_{22}\dot{E}_2^2$$

$$P_1 + jQ_1$$

$$= Y_{11}E_1^2 \exp(-j\varphi_{11}) + Y_{12}E_1E_2 \exp j(\theta_{12} - \varphi_{12})$$

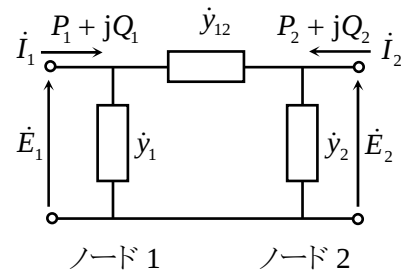
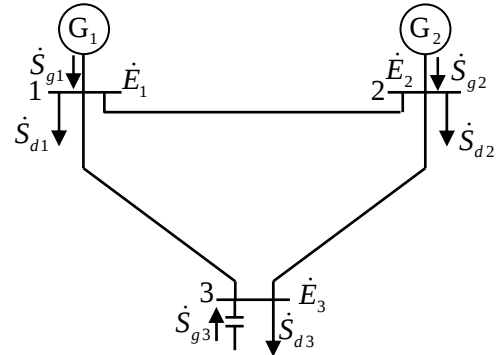
$$P_2 + jQ_2$$

$$= Y_{21}E_1E_2 \exp j(\theta_{21} - \varphi_{21}) + Y_{22}E_2^2 \exp(-j\varphi_{22})$$

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が得られる。

キーワード

直流計算法, 発電機の調速機特性
系統周波数特性, 連携線潮流偏差



次のように表す

$$\dot{Y}_{11} = Y_{11} \exp(j\varphi_{11}), \quad \dot{Y}_{22} = Y_{22} \exp(j\varphi_{22})$$

$$\dot{Y}_{12} = Y_{12} \exp(j\varphi_{12}), \quad \dot{Y}_{21} = Y_{21} \exp(j\varphi_{21})$$

$$\dot{E}_1 = E_1 \exp(j\theta_1), \quad \dot{E}_2 = E_2 \exp(j\theta_2)$$

$$\theta_1 - \theta_2 = \theta_{12}, \quad \theta_2 - \theta_1 = \theta_{21}$$

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

$$Q_1 = -Y_{11}E_1^2 \sin \varphi_{11} + Y_{12}E_1E_2 \sin(\theta_{12} - \varphi_{12})$$

$$P_2 = Y_{22}E_2^2 \cos \varphi_{22} + Y_{21}E_1E_2 \cos(\theta_{21} - \varphi_{21})$$

$$Q_2 = -Y_{22}E_2^2 \sin \varphi_{22} + Y_{21}E_1E_2 \sin(\theta_{21} - \varphi_{21})$$

変数は各ノードの, P , Q , E , θ で 8 個
方程式は 4 個

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

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

ここでノード 1, 2 の電圧の位相角の差 θ_{12} : 小で、ノード 1-2 間の抵抗 $R \ll X$ では、 θ_{12} : 小より $\sin \theta_{12} \approx \theta_{12}$, $\cos \theta_{12} \approx 1$

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

$$P_1 \approx \frac{\theta_1 - \theta_2}{X_{12}} E_1 E_2$$

また、 $E_1 = E_2 = 1 \text{ pu}$ ならば

$$\theta_1 - \theta_2 = X_{12} P_1$$

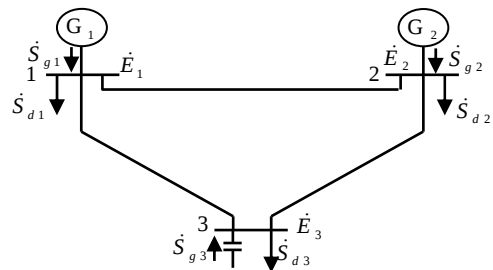
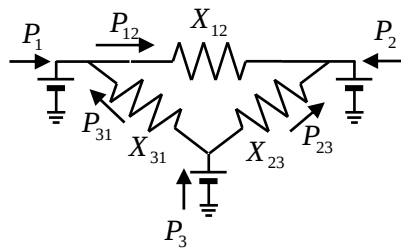
オームの法則 $V = RI$ と対比すると、 $P-\theta$ の関係を直流回路で解くことができる。(直流計算法)

$$\theta_{ij} \rightarrow V$$

$$X_{ij} \rightarrow R$$

$$P_i \rightarrow I$$

簡略化した等価回路



直流計算法による電力潮流計算

右図で、 $E_1 = E_2 = 1 \text{ pu}$ としてノード 1-2 間の相差角を求めよ。

$$1.5 - P_{12} + P_{31} = 0$$

$$P_{12} - 0.5 - P_{23} = 0 \text{ より, } P_{31} = P_{12} - 1.5$$

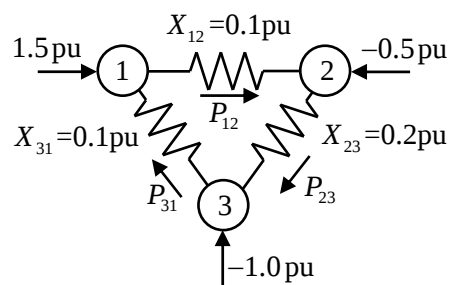
$$P_{23} - 1.0 - P_{31} = 0 \text{ より, } P_{23} = P_{12} - 0.5$$

$$P_{23} - 1.0 - P_{31} = 0$$

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

$$= 0.1 \times P_{12} + 0.2 \times (P_{12} - 0.5) + 0.1 \times (P_{12} - 1.5) = 0$$

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



$$\frac{\theta_1 - \theta_2}{X_{12}} = P_{12} \text{ より}$$

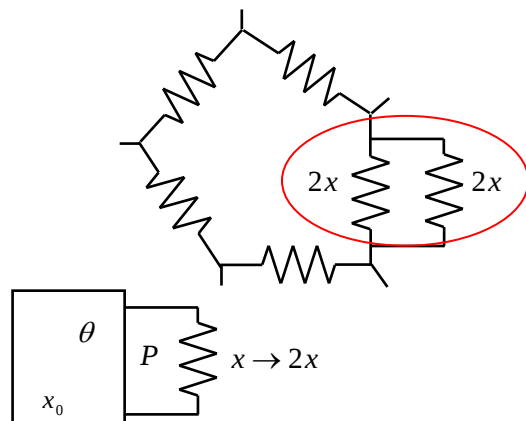
$$\theta_1 - \theta_2 = P_{12} \times X_{12} = 0.0625 \text{ rad}$$

ループ内系統変更時の潮流変動

右図で、楕円で囲った系統内の 1 ブランチが非接続となった場合: インピーダンスは $x \rightarrow 2x$
潮流はテブナンの定理から、初期状態では

$$P_0 = \frac{\theta}{x_0 + x}, \text{ 変更後は } P_1 = \frac{\theta}{x_0 + 2x}$$

$$\text{よって } P_1 = \frac{x_0 + x}{x_0 + 2x} P_0$$



3.9 電力系統の周波数制御

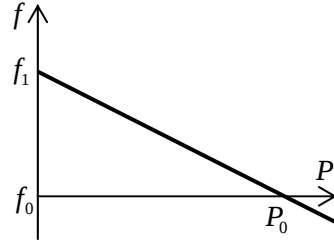
発電機の調速機

周波数 f は回転数 N に対応している。周波数と発電機出力の関係はほぼ直線関係で

$$f = -\frac{f_1 - f_0}{P_0} P + f_1 \text{ より } \Delta f = -\frac{f_1 - f_0}{P_0} \Delta P \text{ だから}$$

$$\Delta P = -\frac{P}{f_1 - f_0} \Delta f$$

ここで、 f : 周波数, f_0 : 定格周波数, f_1 : 無負荷時の周波数(回転数), Δf : 周波数偏差, P : 発電機出力, P_0 : 定格出力, ΔP : 出力偏差。



負荷が増加すると、周波数は減少し、負荷が減少すると周波数は増加。

負荷と周波数の関係電力潮流: 電力の流れ

電力系統の周波数特性

- 負荷周波数特性

$$\frac{\Delta P_L}{\Delta f} = -K_L \quad (1)$$

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 $K_L = 0.03 \sim 0.06$ [MW/Hz]

- 発電機周波数特性

$$\frac{\Delta P_G}{\Delta f} = K_G \quad (2)$$

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 $K_G = 0.07 \sim 0.14$ [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 $K = 0.1 \sim 0.2$ [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。

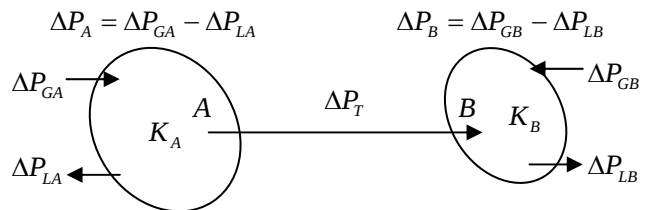
(4)より

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

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

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