電力システム解析論

第08回　潮流計算2

平成27年12月8日

潮流計算

- 電力系統の各点における電圧・電流・電力・力率等の状態量を求める
- 負荷の増大，発電所や送電線の新設等の電力系統の設備計画に不可欠
- 電力系統運用において，将来的に生じる問題を明らかにする
- 電子計算機の無かったころは，直流計算盤・交流計算盤を用いてアナログ的に算出

潮流計算に用いる条件

- 解析条件
  - 一母線を除き有効電力を設定
    - 負荷電力を負で表す
    - 有効電力を指定しない母線
      - スラック母線・スイング母線
      - 発電機母線が一般的
      - 皺取り・位相基準
  - 母線への注入無効電力又は電圧の大きさを設定
    - 一般的な設定
      - 負荷母線は無効電力
      - 発電機母線は電圧

n母線系統

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \\ \vdots \\ \dot{I}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{Y}_{11} & \dot{Y}_{12} & \cdots & \dot{Y}_{1n} \\ \dot{Y}_{21} & \dot{Y}_{22} & & \dot{Y}_{2n} \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ \dot{Y}_{n1} & \dot{Y}_{n2} & \cdots & \dot{Y}_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_1 \\ \dot{V}_2 \\ \vdots \\ \dot{V}_n \end{bmatrix}$$

潮流計算の方法

- 潮流計算は閉形式で求まらない
  - 繰り返し計算
  - 微係数を用いない
    - ガウス法
    - ガウスザイデル法
  - 微係数を用いる
    - ニュートンラフソン法
      - 直交座標
      - 極座標
        - » 普通のやり方
        - » 分離法
        - » 高速分離法

潮流計算

- 線路条件・状態変数
  - 4母線系統

$$\begin{bmatrix}\dot{I}_1\\\dot{I}_2\\\dot{I}_3\\\dot{I}_4\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\dot{Y}_{11}&\dot{Y}_{12}&\dot{Y}_{13}&\dot{Y}_{14}\\\dot{Y}_{21}&\dot{Y}_{22}&\dot{Y}_{23}&\dot{Y}_{24}\\\dot{Y}_{31}&\dot{Y}_{32}&\dot{Y}_{33}&\dot{Y}_{34}\\\dot{Y}_{41}&\dot{Y}_{42}&\dot{Y}_{43}&\dot{Y}_{44}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{V}_1\\\dot{V}_2\\\dot{V}_3\\\dot{V}_4\end{bmatrix}$$

- 潮流条件
  - 発電機母線→PV指定
  - 負荷母線→PQ指定
  - 無限大母線→V指定（位相基準∠0deg）

ガウスザイデル法1

- 4母線系統で考える
  - 母線1をスイング母線
    - 計算を母線2から開始する
      - 母線2がP,Q指定母線の場合(Qは遅れが正)

$$\dot{V}_2\overline{\dot{I}_2}=P_2+jQ_2$$

» 母線電流

$$\dot{I}_2=\frac{P_2-jQ_2}{\overline{\dot{V}_2}}$$

ガウスザイデル法2

» アドミタンス行列の関係

$$\dot{I}_2 = \dot{Y}_{21}\dot{V}_1 + \dot{Y}_{22}\dot{V}_2 + \dot{Y}_{23}\dot{V}_3 + \dot{Y}_{24}\dot{V}_4$$

» 代入

$$\frac{P_2 - jQ_2}{\overline{V_2}} = Y_{21}V_1 + Y_{22}V_2 + Y_{23}V_3 + Y_{24}V_4$$

» 母線2の電圧

$$V_2 = \frac{1}{Y_{22}}\left[\frac{P_2 - jQ_2}{\overline{V_2}} - Y_{21}V_1 - Y_{23}V_3 - Y_{24}V_4\right]$$

» 繰り返し計算において，前回の電圧 $\overline{V_2}$ を用いて新たな電圧 V_2 を求める

» 修正したV_2 を用いてもう一度計算する手順が一般的

ガウスザイデル法3

– 修正した全母線電圧を用いて，次の計算ステップに進む

- 求めた電圧をそのまま次の計算ステップに用いる
  - – ガウス法
- 求めた電圧でもう一度電圧を計算し押し，次の計算ステップに進む
  - – ガウスザイデル法

– 初期の設定値が解から離れていると，欲しい解に収束しないことがある

– 必要な繰り返し数が多い

- 電圧の修正に加速係数を掛ける

ガウスザイデル法

- N母線系統
  - P,Q指定母線
    - 母線kの電圧

$$V_k = \frac{1}{Y_{kk}}\left[\frac{P_k - jQ_k}{\overline{V_k}} - \sum_{\substack{n=1\\ n\neq k}}^{N} Y_{kn}V_n\right]$$

  - P,V指定母線
    - 初期値に対して，母線kの無効電力Q_kを求める

$$P_k - jQ_k = \overline{V_k}\sum_{n=1}^{N} Y_{kn}V_n$$

      - Pkは指定値
      - Qkについて考える

$$Q_k = -\mathrm{Im}\left[\overline{V_k}\sum_{n=1}^{N} Y_{kn}V_n\right]$$

ガウスザイデル法

  - P,V指定母線
    - 母線kの電圧を算出

$$V_k = \frac{1}{Y_{kk}}\left[\frac{P_k - jQ_k}{\overline{V_k}} - \sum_{\substack{n=1\\ n\neq k}}^{N} Y_{kn}V_n\right]$$

      - Pkは指定値，Qkは求めた値
      - 指定したVkの振幅に合うように複素量のVkを縮小
        - » 縮小率α

$$\alpha = \frac{V_{k\text{指定値}}}{\left|\dot{V}_{k\text{計算値}}\right|}$$

$$\dot{V}_{k\text{計算値(新)}} = \alpha \dot{V}_{k\text{計算値}}$$

ニュートンラフソン法1

- 潮流計算用関数のテーラー展開を利用
  - 2変数の2関数を考える
    - 変数x_1,x_2,関数f_1,f_2,定数K_1,K_2

$$\begin{cases} f_1(x_1, x_2) = K_1 \\ f_2(x_1, x_2) = K_2 \end{cases}$$

    - 初期値$x_1^{(0)}$,$x_2^{(0)}$,修正分$\Delta x_1^{(0)}$,$\Delta x_2^{(0)}$

$$\begin{cases} f_1(x_1, x_2) = f_1\left(x_1^{(0)} + \Delta x_1^{(0)}, x_2^{(0)} + \Delta x_2^{(0)}\right) = K_1 \\ f_2(x_1, x_2) = f_2\left(x_1^{(0)} + \Delta x_1^{(0)}, x_2^{(0)} + \Delta x_2^{(0)}\right) = K_2 \end{cases}$$

ニュートンラフソン法2

- 修正分$\Delta x_1^{(0)}$,$\Delta x_2^{(0)}$を求める事を考える
- テーラー展開

$$\begin{cases} K_1 = f_1\left(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}\right) + \Delta x_1^{(0)} \left.\dfrac{\partial f_1}{\partial x_1}\right|_{(0)} + \Delta x_2^{(0)} \left.\dfrac{\partial f_1}{\partial x_2}\right|_{(0)} \cdots \\ K_2 = f_2\left(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}\right) + \Delta x_1^{(0)} \left.\dfrac{\partial f_2}{\partial x_1}\right|_{(0)} + \Delta x_2^{(0)} \left.\dfrac{\partial f_2}{\partial x_2}\right|_{(0)} \cdots \end{cases}$$

ニュートンラフソン法3

- テーラー展開の二階以上の項を無視

$$\begin{bmatrix} K_1 - f_1\left(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}\right) \\ K_2 - f_2\left(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}\right) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dfrac{\partial f_1}{\partial x_1} & \dfrac{\partial f_1}{\partial x_2} \\ \dfrac{\partial f_2}{\partial x_1} & \dfrac{\partial f_2}{\partial x_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1^{(0)} \\ \Delta x_2^{(0)} \end{bmatrix}$$

  – 変微分の正方行列をヤコビアンと呼ぶ

    » K_1,K_2の誤差で表す

$$\begin{bmatrix} \Delta K_1^{(0)} \\ \Delta K_2^{(0)} \end{bmatrix} = J^{(0)} \begin{bmatrix} \Delta x_1^{(0)} \\ \Delta x_2^{(0)} \end{bmatrix} \quad \Rightarrow \quad \begin{bmatrix} \Delta x_1^{(0)} \\ \Delta x_2^{(0)} \end{bmatrix} = J^{(0)-1} \begin{bmatrix} \Delta K_1^{(0)} \\ \Delta K_2^{(0)} \end{bmatrix}$$

ニュートンラフソン法4

- 求めた修正値$\Delta x_1^{(0)}$,$\Delta x_2^{(0)}$を用いて，新しい値を求める

$$\begin{cases} x_1^{(1)} = x_1^{(0)} + \Delta x_1^{(0)} \\ x_2^{(1)} = x_2^{(0)} + \Delta x_2^{(0)} \end{cases}$$

- このプロセスを繰り返す
  – 終了判定条件

$$Max\left\{\left|x_1^{(n+1)} - x_1^{(n)}\right|, \cdots, \left|x_k^{(n+1)} - x_k^{(n)}\right|, \left|x_{2N}^{(n+1)} - x_{2N}^{(n)}\right|\right\} < \varepsilon$$

有効・無効電力の計算

直交座標

- 電圧 $\dot{V}_k = e_k + jf_k$
- アドミタンス $\dot{Y}_{km} = G_{km} + jB_{km}$
- 電力

$$
\begin{aligned}
P_k + jQ_k &= \dot{V}_k \bar{\dot{I}}_k \\
&= \sum_{m=1}^{N} \bar{\dot{Y}}_{km} \bar{\dot{V}}_m \dot{V}_k \\
&= \sum_{m=1}^{N} (G_{km} - jB_{km})(e_m - jf_m)(e_k + jf_k)
\end{aligned}
$$

極座標

- 電圧 $\dot{V}_k = V_k \angle \delta_k = V_k e^{j\delta_k}$
- アドミタンス $\dot{Y}_{km} = Y_{km} \angle \theta_{km} = Y_{km} e^{j\theta_{km}}$
- 電力

$$
\begin{aligned}
P_k + jQ_k &= \dot{V}_k \bar{\dot{I}}_k \\
&= \sum_{m=1}^{N} \bar{\dot{Y}}_{km} \bar{\dot{V}}_m \dot{V}_k \\
&= \sum_{m=1}^{N} Y_{km} e^{-j\theta_{km}} V_m e^{-j\delta_m} V_k e^{j\delta_k} \\
&= \sum_{m=1}^{N} V_k V_m Y_{km} e^{j(\delta_k - \delta_m - \theta_{km})}
\end{aligned}
$$