電力システム解析論

第10回　潮流計算3

平成28年1月5日

潮流計算の利用

- 潮流計算結果
  - 母線電圧（振幅，位相），母線電力
  - 線路潮流
- 利用方法
  - 未建設の電力システムの運用状態の検討
  - 既設電力システムにおける制御効果の検証
    - 変圧器のタップ変更
      - 各母線の電圧を許容範囲内に維持可能か
        維持できない場合はタップ変更し，再度潮流計算
    - 系統間連系時の連系線潮流の維持
      - 規定値内に収めるための発電量の調整

ニュートンラフソン法

- 2変数の2関数
  - 変数x_1,x_2,関数f_1,f_2,定数K_1,K_2
  - テーラー展開の二階以上の項を無視

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

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

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

ニュートンラフソン法の適用 直交座標1

- 母線kの電圧（直交座標表示）

$$\dot{V}_k = e_k + jf_k$$

- 母線kの電力（直交座標状態量）

$$P_k + jQ_k = \dot{V}_k \bar{\dot{I}}_k = \sum_{m=1}^{N} \bar{\dot{Y}}_{km} \bar{\dot{V}}_m \dot{V}_k$$

$$= \sum_{m=1}^{N} \bar{\dot{Y}}_{km} (e_m - jf_m)(e_k + jf_k)$$

  - N母線系統(発電機1~h,負荷h+1~N)
  - スラック母線1→電圧，位相角指定
  - 発電機母線→P,V指定(Pgs,Vgs)
  - 負荷母線→P,Q指定(Pls,Qls)

指定のs

ニュートンラフソン法の適用 直交座標2

- 繰返し計算n回目で得られた母線電圧の値

$$e_2{}^n, f_2{}^n, \cdots, e_N{}^n, f_N{}^n$$

- 各母線の有効・無効電力,母線電圧の計算値と設定値の差
  - 発電機母線
    - g=2,3,・・・,h
  - 負荷母線
    - l=h+1,・・・,N

$$\begin{cases} \Delta P_g{}^n = P_{gs} - P_g\left(e_1, f_1, e_2{}^n, f_2{}^n, \cdots, e_N{}^n, f_N{}^n\right) \\ \Delta\left|V_g{}^n\right|^2 = V_{gs}{}^2 - \left\{\left(e_g{}^n\right)^2 + \left(f_g{}^n\right)^2\right\} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \Delta P_l{}^n = P_{ls} - P_l\left(e_1, f_1, e_2{}^n, f_2{}^n, \cdots, e_N{}^n, f_N{}^n\right) \\ \Delta Q_l{}^n = Q_{ls} - Q_l\left(e_1, f_1, e_2{}^n, f_2{}^n, \cdots, e_N{}^n, f_N{}^n\right) \end{cases}$$

ニュートンラフソン法の適用 直交座標3

- 修正方程式

ヤコビアン(6種)
(いまから求める)

2(N-1)x2(N-1)

$$\begin{bmatrix} \Delta P_g{}^n \\ \cdots \\ \Delta\left|V_g{}^n\right|^2 \\ \cdots \\ \Delta P_l{}^n \\ \cdots \\ \Delta Q_l{}^n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_g}{\partial e_2} & \frac{\partial P_g}{\partial f_2} & \cdots & \frac{\partial P_g}{\partial e_N} & \frac{\partial P_g}{\partial f_N} \\ \frac{\partial V_g{}^2}{\partial e_2} & \frac{\partial V_g{}^2}{\partial f_2} & \cdots & \frac{\partial V_g{}^2}{\partial e_N} & \frac{\partial V_g{}^2}{\partial f_N} \\ \frac{\partial P_l}{\partial e_2} & \frac{\partial P_l}{\partial f_2} & & \frac{\partial P_l}{\partial e_N} & \frac{\partial P_l}{\partial f_N} \\ \frac{\partial Q_l}{\partial e_2} & \frac{\partial Q_l}{\partial f_2} & & \frac{\partial Q_l}{\partial e_N} & \frac{\partial Q_l}{\partial f_N} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta e_2{}^n \\ \Delta f_2{}^n \\ \cdots \\ \Delta e_N{}^n \\ \Delta f_N{}^n \end{bmatrix}$$

ニュートンラフソン法の適用 直交座標4

- 次の近似値

$$\begin{cases} e_k^{\ n+1} = e_k^{\ n} + \Delta e_k^{\ n} \\ f_k^{\ n+1} = f_k^{\ n} + \Delta f_k^{\ n} \end{cases}$$

- アドミタンス行列の各要素

$$\dot{Y}_{km} = G_{km} + jB_{km}\left(k, m = 1,2,\cdots, N\right)$$

ニュートンラフソン法の適用 直交座標5

- 母線kから流出する電流の和

$$\dot{I}_k = a_k + jb_k = \sum_{m=1}^{N} \dot{Y}_{km}\dot{V}_m = \sum_{m=1}^{N}\left(G_{km} + jB_{km}\right)\left(e_m + jf_m\right)$$

$$= \sum_{m=1}^{N}\left(G_{km}e_m - B_{km}f_m\right) + j\sum_{m=1}^{N}\left(G_{km}f_m + B_{km}e_m\right)$$

- 母線kの電圧の大きさ

$$V_k^{\ 2} = e_k^{\ 2} + f_k^{\ 2}$$

ニュートンラフソン法の適用 直交座標6

- 母線kから流出する有効電力

$$
\begin{aligned}
P_k &= e_k a_k + b_k f_k \\
&= \sum_{m=1}^{N} \left(G_{km} e_m e_k - B_{km} e_k f_m + G_{km} f_m f_k + B_{km} e_m f_k \right)
\end{aligned}
$$

- 母線kから流出する無効電力

$$
\begin{aligned}
Q_k &= f_k a_k - e_k b_k \\
&= \sum_{m=1}^{N} \left(-G_{km} e_k f_m - B_{km} e_k e_m + G_{km} e_m f_k - B_{km} f_m f_k \right)
\end{aligned}
$$

ニュートンラフソン法の適用 直交座標7

- 修正方程式の係数(反復回数n回目)
  - 非対角要素k≠m

$$
\begin{aligned}
\left(\frac{\partial P_k}{\partial e_m} \right)_n &= \frac{\partial}{\partial e_m} \sum_{i=1}^{N} \left(G_{ki} e_i^{\,n} e_k^{\,n} - B_{ki} e_k^{\,n} f_i^{\,n} + G_{ki} f_i^{\,n} f_k^{\,n} + B_{ki} e_i^{\,n} f_k^{\,n} \right) \\
&= G_{km} e_k^{\,n} + B_{km} f_k^{\,n}
\end{aligned}
$$

$$
\begin{aligned}
\left(\frac{\partial Q_k}{\partial e_m} \right)_n &= \frac{\partial}{\partial e_m} \sum_{i=1}^{N} \left(-G_{ki} e_k^{\,n} f_i^{\,n} - B_{ki} e_k^{\,n} e_i^{\,n} + G_{ki} e_i^{\,n} f_k^{\,n} - B_{ki} f_i^{\,n} f_k^{\,n} \right) \\
&= -B_{km} e_k^{\,n} + G_{km} f_k^{\,n}
\end{aligned}
$$

ニュートンラフソン法の適用 直交座標8

- 修正方程式の係数(反復回数n回目)
  - 非対角要素k≠m

$$\left(\frac{\partial P_k}{\partial f_m}\right)_n = \frac{\partial}{\partial f_m}\sum_{i=1}^{N}\left(G_{ki}e_i{}^n e_k{}^n - B_{ki}e_k{}^n f_i{}^n + G_{ki}f_i{}^n f_k{}^n + B_{ki}e_i{}^n f_k{}^n\right)$$

$$= -B_{km}e_k{}^n + G_{km}f_k{}^n = \left(\frac{\partial Q_k}{\partial e_m}\right)_n$$

$$\left(\frac{\partial Q_k}{\partial f_m}\right)_n = \frac{\partial}{\partial f_m}\sum_{i=1}^{N}\left(-G_{ki}e_k{}^n f_i{}^n - B_{ki}e_k{}^n e_i{}^n + G_{ki}e_i{}^n f_k{}^n - B_{ki}f_i{}^n f_k{}^n\right)$$

$$= -G_{km}e_k{}^n - B_{km}f_k{}^n = -\left(\frac{\partial P_k}{\partial e_m}\right)_n$$

ニュートンラフソン法の適用 直交座標9

- 修正方程式の係数(反復回数n回目)
  - 非対角要素k≠m

$$\left(\frac{\partial V_k{}^2}{\partial e_m}\right)_n = \frac{\partial}{\partial e_m}\left(e_k{}^{2^n} + f_k{}^{2^n}\right) = 0$$

$$\left(\frac{\partial V_k{}^2}{\partial f_m}\right)_n = \frac{\partial}{\partial f_m}\left(e_k{}^{2^n} + f_k{}^{2^n}\right) = 0$$

ニュートンラフソン法の適用 直交座標10

- 修正方程式の係数(反復回数n回目)
  - 対角要素k=m

$$\left(\frac{\partial P_k}{\partial e_k}\right)_n = \frac{\partial}{\partial e_k}\sum_{i=1}^{N}\left(G_{ki}e_i^{\,n}e_k^{\,n} - B_{ki}e_k^{\,n}f_i^{\,n} + G_{ki}f_i^{\,n}f_k^{\,n} + B_{ki}e_i^{\,n}f_k^{\,n}\right)$$

$$= \sum_{i=1}^{N}\left(G_{ki}e_i^{\,n} - B_{ki}f_i^{\,n}\right) + G_{kk}e_k^{\,n} + B_{kk}f_k^{\,n}$$

$$= a_k^{\,n} + G_{kk}e_k^{\,n} + B_{kk}f_k^{\,n}$$

ニュートンラフソン法の適用 直交座標11

- 修正方程式の係数(反復回数n回目)
  - 対角要素k=m

$$\left(\frac{\partial Q_k}{\partial e_k}\right)_n = \frac{\partial}{\partial e_k}\sum_{i=1}^{N}\left(-G_{ki}e_k^{\,n}f_i^{\,n} - B_{ki}e_k^{\,n}e_i^{\,n} + G_{ki}e_i^{\,n}f_k^{\,n} - B_{ki}f_i^{\,n}f_k^{\,n}\right)$$

$$= \sum_{i=1}^{N}\left(-G_{ki}f_i^{\,n} - B_{ki}e_i^{\,n}\right) + G_{kk}f_k^{\,n} - B_{kk}e_k^{\,n}$$

$$= -\sum_{i=1}^{N}\left(G_{ki}f_i^{\,n} + B_{ki}e_i^{\,n}\right) + G_{kk}f_k^{\,n} - B_{kk}e_k^{\,n}$$

$$= -b_k^{\,n} + G_{kk}f_k^{\,n} - B_{kk}e_k^{\,n}$$

ニュートンラフソン法の適用 直交座標12

- 修正方程式の係数(反復回数n回目)
  - 対角要素k=m

$$\left(\frac{\partial P_k}{\partial f_k}\right)_n = \frac{\partial}{\partial f_k}\sum_{i=1}^{N}\left(G_{ki}e_i{}^n e_k{}^n - B_{ki}e_k{}^n f_i{}^n + G_{ki}f_i{}^n f_k{}^n + B_{ki}e_i{}^n f_k{}^n\right)$$

$$= \sum_{i=1}^{N}\left(G_{ki}f_i{}^n + B_{ki}e_i{}^n\right) - B_{kk}e_k{}^n + G_{kk}f_k{}^n$$

$$= b_k{}^n + G_{kk}f_k{}^n - B_{kk}e_k{}^n$$

$$= \left(\frac{\partial Q_k}{\partial e_k}\right)_n - 2b_k{}^n$$

ニュートンラフソン法の適用 直交座標13

- 修正方程式の係数(反復回数n回目)
  - 対角要素k=m

$$\left(\frac{\partial Q_k}{\partial f_k}\right)_n = \frac{\partial}{\partial f_k}\sum_{i=1}^{N}\left(-G_{ki}e_k{}^n f_i{}^n - B_{ki}e_k{}^n e_i{}^n + G_{ki}e_i{}^n f_k{}^n - B_{ki}f_i{}^n f_k{}^n\right)$$

$$= \sum_{i=1}^{N}\left(G_{ki}e_i{}^n - B_{ki}f_i{}^n\right) - G_{kk}e_k{}^n - B_{kk}f_k{}^n$$

$$= a_k{}^n - G_{kk}e_k{}^n - B_{kk}f_k{}^n$$

$$= -\left(\frac{\partial P_k}{\partial e_k}\right)_n + 2a_k{}^n$$

ニュートンラフソン法の適用 直交座標14

- 修正方程式の係数(反復回数n回目)
  - 対角要素k=m

$$\left(\frac{\partial V_k^{\ 2}}{\partial e_k}\right)_n = \frac{\partial}{\partial e_k}\left(e_k^{\ 2^n} + f_k^{\ 2^n}\right) = 2e_k^{\ n}$$

$$\left(\frac{\partial V_k^{\ 2}}{\partial f_k}\right)_n = \frac{\partial}{\partial f_k}\left(e_k^{\ 2^n} + f_k^{\ 2^n}\right) = 2\,f_k^{\ n}$$

ニュートンラフソン法の適用 直交座標15

- n回目の反復計算により得られた母線電圧

$$\dot{V}_k^{\ n} = e_k^{\ n} + jf_k^{\ n} \qquad k = 2,3,\cdots,N$$

- n+1回目の反復計算により得られる母線電圧

$$\begin{aligned}\dot{V}_k^{\ n+1} &= e_k^{\ n+1} + jf_k^{\ n+1} \\ &= e_k^{\ n} + \Delta e_k^{\ n} + j\left(f_k^{\ n} + \Delta f_k^{\ n}\right)\end{aligned}$$

- 母線電圧を用いて次の値を求める

$$\Delta P_g^{\ n+1}, \left|\Delta V_g^{\ n+1}\right|, \Delta P_l^{n+1}, \Delta Q_l^{\ n+1}$$