

電力システム解析論

第09回 潮流計算3

平成25年12月06日

ニュートンラフソン法

- 2変数の2関数

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

- 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

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

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

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
- 電力 $\dot{Y}_{km} = Y_{km} \angle \theta_{km} = Y_{km} e^{j\theta_{km}}$

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

2013/12/06

電力システム解析論

3

ニュートンラフソン法の適用 極座標 1

• 極座標での潮流計算

– 電圧・アドミタンス

$$\begin{cases} \dot{V}_k = V_k \angle \delta_k \\ \dot{V}_m = V_m \angle \delta_m \end{cases} \quad \begin{cases} \dot{Y}_{km} = Y_{km} \angle \theta_{km} \\ \dot{I}_k = \sum_{m=1}^N \dot{Y}_{km} \dot{V}_m = \sum_{m=1}^N Y_{km} V_m \angle \theta_{km} + \delta_m \end{cases}$$

– 電力

$$\begin{aligned}
 P_k + jQ_k &= \dot{V}_k \bar{\dot{I}}_k = V_k \angle \delta_k \sum_{m=1}^N Y_{km} V_m \angle -\theta_{km} - \delta_m = \sum_{m=1}^N V_k V_m Y_{km} \angle \delta_k - \delta_m - \theta_{km} \\
 &\begin{cases} P_k = \sum_{m=1}^N V_k V_m Y_{km} \cos(\delta_k - \delta_m - \theta_{km}) \\ Q_k = \sum_{m=1}^N V_k V_m Y_{km} \sin(\delta_k - \delta_m - \theta_{km}) \end{cases}
 \end{aligned}$$

2013/12/06

電力システム解析論

4

ニュートンラフソン法の適用 極座標2

• 修正方程式

– 指定値 P_k, Q_k と計算値 $P_{k,calc}, Q_{k,calc}$ の誤差

$$\begin{matrix} \Delta P_k, \Delta Q_k \\ \left[\begin{array}{c} \Delta P_2 \\ \Delta P_3 \\ \dots \\ \Delta Q_2 \\ \Delta Q_3 \end{array} \right] = \left[\begin{array}{cccc} \frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_3} & \frac{\partial P_2}{\partial V_2} & \frac{\partial P_2}{\partial V_3} \\ \frac{\partial P_3}{\partial \delta_2} & \frac{\partial P_3}{\partial \delta_3} & \frac{\partial P_3}{\partial V_2} & \frac{\partial P_3}{\partial V_3} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2} & \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_3} & \frac{\partial Q_2}{\partial V_2} & \frac{\partial Q_2}{\partial V_3} \\ \frac{\partial Q_3}{\partial \delta_2} & \frac{\partial Q_3}{\partial \delta_3} & \frac{\partial Q_3}{\partial V_2} & \frac{\partial Q_3}{\partial V_3} \\ \frac{\partial Q_3}{\partial \delta_2} & \frac{\partial Q_3}{\partial \delta_3} & \frac{\partial Q_3}{\partial V_2} & \frac{\partial Q_3}{\partial V_3} \end{array} \right] \left[\begin{array}{c} \Delta \delta_2 \\ \Delta \delta_3 \\ \dots \\ \Delta V_2 \\ \Delta V_3 \end{array} \right] \end{matrix}$$

ヤコビアン
(いまから求める)

2013/12/06

電力システム解析論

5

ニュートンラフソン法の適用 極座標3

• 修正方程式の係数

$$\frac{\partial P_k}{\partial \delta_l} = \frac{\partial}{\partial \delta_l} \sum_{m=1}^N V_k V_m Y_{km} \cos(\delta_k - \delta_m - \theta_{km})$$

– 非対角項 $l \neq k$

$$\frac{\partial P_k}{\partial \delta_l} = V_k V_l Y_{kl} \sin(\delta_k - \delta_l - \theta_{kl})$$

– 対角項 $l = k$

$$\frac{\partial P_k}{\partial \delta_l} = \frac{\partial P_k}{\partial \delta_k} = - \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq k}}^N V_k V_m Y_{km} \sin(\delta_k - \delta_m - \theta_{km})$$

2013/12/06

電力システム解析論

6

ニュートンラフソン法の適用 極座標4

- 修正方程式の係数

$$\frac{\partial Q_k}{\partial \delta_l} = \frac{\partial}{\partial \delta_l} \sum_{m=1}^N V_k V_m Y_{km} \sin(\delta_k - \delta_m - \theta_{km})$$

– 非対角項 $l \neq k$

$$\frac{\partial Q_k}{\partial \delta_l} = -V_k V_l Y_{kl} \cos(\delta_k - \delta_l - \theta_{kl})$$

– 対角項 $l = k$

$$\frac{\partial Q_k}{\partial \delta_l} = \frac{\partial Q_k}{\partial \delta_k} = \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq k}}^N V_k V_m Y_{km} \cos(\delta_k - \delta_m - \theta_{km})$$

ニュートンラフソン法の適用 極座標 5

- 修正方程式の係数

$$\frac{\partial P_k}{\partial V_l} = \frac{\partial}{\partial V_l} \sum_{m=1}^N V_k V_m Y_{km} \cos(\delta_k - \delta_m - \theta_{km})$$

– 非対角項 $l \neq k$

$$\frac{\partial P_k}{\partial V_l} = V_k Y_{kl} \cos(\delta_k - \delta_l - \theta_{kl})$$

– 対角項 $l = k$

$$\frac{\partial P_k}{\partial V_l} = \frac{\partial P_k}{\partial V_k} = \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq k}}^N V_m Y_{km} \cos(\delta_k - \delta_m - \theta_{km}) + 2V_k Y_{kk} \cos \theta_{kk}$$

ニュートンラフソン法の適用 極座標6

- 修正方程式の係数

$$\frac{\partial Q_k}{\partial V_l} = \frac{\partial}{\partial V_l} \sum_{m=1}^N V_k V_m Y_{km} \sin(\delta_k - \delta_m - \theta_{km})$$

- 非対角項 $l \neq k$

$$\frac{\partial Q_k}{\partial V_l} = V_k Y_{kl} \sin(\delta_k - \delta_l - \theta_{kl})$$

- 対角項 $l = k$

$$\frac{\partial Q_k}{\partial V_l} = \frac{\partial Q_k}{\partial V_k} = \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq k}}^N V_m Y_{km} \sin(\delta_k - \delta_m - \theta_{km}) + 2V_k Y_{kk} \sin \theta_{kk}$$

ニュートンラフソン法の適用 極座標7

- 潮流計算へのニュートンラフソン法の適用

- PV指定母線

- 電圧は与えられているので求める必要が無い
 - 行列の次数が低くなる
- 位相角のみ求める

- 極座標表示と直交座標表示

- 極座標表示では, P_k と δ_k , Q_k と $|V_k|$ の関係が明示的に現れる

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

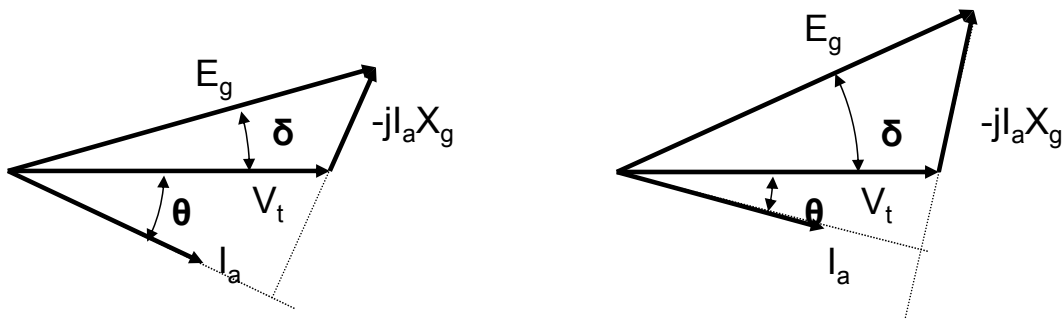
2013/12/06

電力システム解析論

11

発電機制御と電力潮流

- 母線電圧 V_t と発電機起電力 E_g の関係を表すフェーザ図



- 起電力 E_g 一定(界磁一定)で, 原動機入力を大きくすると, E_g と V_t の角度差 $\cdot I_a$ が増大, 力率角減少

2013/12/06

電力システム解析論

12

電力方程式

- 母線電圧 $V_t = |V_t| \angle 0^\circ$
- 発電機内部電圧 $E_g = |E_g| \angle \delta$
- 発電機内部リアクタンス X_g
- 発電機端子電流 $I_a = \frac{|E_g| \angle \delta - V_t}{jX_g}$
- 発電機出力電力 $P + jQ = V_t \bar{I}_a = \frac{|V_t| |E_g| \angle -\delta - |V_t|^2}{-jX_g}$
 - 有効電力 $P = \frac{|V_t| |E_g|}{X_g} \sin \delta$
 - 無効電力 $Q = \frac{|V_t|}{X_g} (|E_g| \cos \delta - |V_t|)$

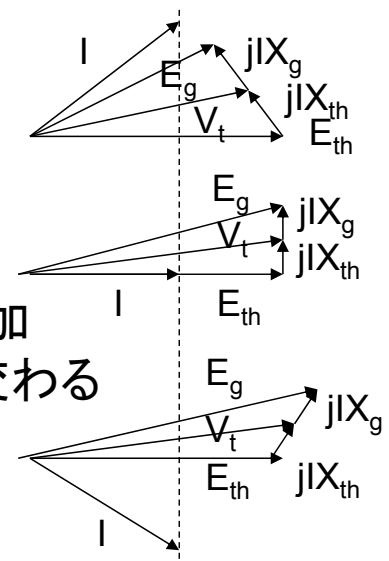
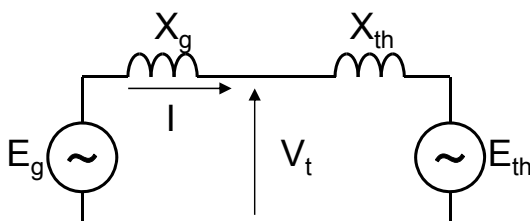
2013/12/06

電力システム解析論

13

母線電圧の制御 発電機の界磁制御

- 発電機母線→PV指定
 - Qは潮流計算で求まる
 - フェーザ図
 - P一定, E_{th} 一定
 - V_t 大→ E_g 大→発電機の励磁増加
電流Iの位相遅れる→無効電力増加
←界磁によりQ調整すると電圧も変わる



2013/12/06

電力システム解析論

14

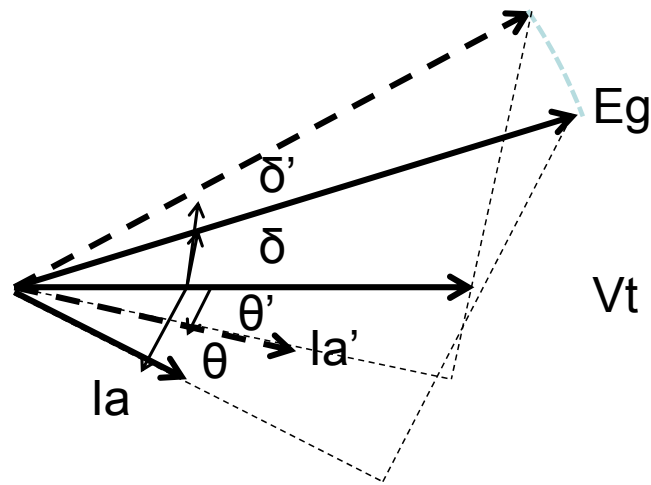
発電機のふるまい

- 発電機の励磁(界磁)入力に対するふるまい
 - 発電機の励磁(界磁)により, 発電機と電力系統間の無効電力を制御できる
 - 同期発電機を過励磁すると電力系統側に無効電力を供給
 - 同期発電機を不足励磁すると電力系統側から無効電力を吸収
 - 無効電力を変えると何が起こるか？

発電機のふるまい

- 発電機の機械入力に対するふるまい
 - 相边角 δ で, 発電機が有効電力 P を電力系統側に安定に供給している状態
 - 母線電圧 V_t に対し, 発電機端子電圧 E_g は角度 δ 進んでいる
 - 端子電圧を変えずに, 原動機入力を増やした場合(蒸気タービンや水車のバルブを開く)
 - 回転子が加速する
 - 母線電圧 V_t と発電機端子電圧 E_g の角度 δ が増加
 - 端子電流 I_a が増加し, 力率角 θ が減少
 - 発電機の実出力電力 P が増加
 - 原動機入力と再び釣り合う

発電機のふるまい



電力方程式

- 母線電圧 $V_t = |V_t| \angle 0^\circ$
- 発電機内部電圧 $E_g = |E_g| \angle \delta$
- 発電機内部リアクタンス X_g
- 発電機端子電流 $I_a = \frac{|E_g| \angle \delta - V_t}{jX_g}$
- 発電機出力電力 $P + jQ = V_t \bar{I}_a = \frac{|V_t| |E_g| \angle -\delta - |V_t|^2}{-jX_g}$
 - 有効電力 $P = \frac{|V_t| |E_g|}{X_g} \sin \delta$
 - 無効電力 $Q = \frac{|V_t|}{X_g} (|E_g| \cos \delta - |V_t|)$

発電機のふるまい

- 有効電力
$$P = \frac{|V_t||E_g|}{X_g} \sin \delta$$
 - $|V_t||E_g|$ が一定でも, δ によって電力P大きくなる
 - PとVtが一定の場合, 励磁によりEgが増加すると, δ は減少
- 無効電力
$$Q = \frac{|V_t|}{X_g} (|E_g| \cos \delta - |V_t|)$$
 - 発電機出力Pが一定で, 発電機端子電圧Egが増加, 相
差角 δ が減少するとQは増加する

母線間の潮流

- 母線電圧V1,V2
 - V2に対してV1の位相が δ 進んでいる
- 母線間のリアクタンスX
$$P = \frac{|V_1||V_2|}{X} \sin \delta$$
- 有効電力
$$Q = \frac{|V_2|}{X} (|V_1| \cos \delta - |V_2|)$$
- 母線2の受電する無効電力
- 相差角 δ が小さい($<15^\circ$) δ の変化に対して
 - Qはほとんど変化しない $\cos \delta \doteq 1$
 - Pは δ にほぼ比例して変化 $\sin \delta \doteq \delta$

母線電圧の制御

発電機の界磁制御

- 発電機の出る無効電力 Q が母線電圧にどのような影響を与えるか？
- 発電機母線→PV指定
 - Q は潮流計算で求まる
 - フェーザ図
 - P 一定(I の E_{th} と同相成分が一定), E_{th} 一定
 - V_t 大→ E_g 大→発電機の励磁増加
電流 I の位相遅れる→無効電力増加
←界磁により Q 調整すると電圧も変わる