第4回の内容

- 正常時の電力伝送特性
- 送受電端電圧
- 送電電力
- 単位法

キーワード

複素電力, フェランチ現象, 単位法(pu 法)

基準値, %インピーダンス

見学会のおしらせ

東京電力 11 月 14 日(金), 東芝 11 月 21 日(金)

第3章:正常時の電力伝送特性

3.1 複素電力

誘導性負荷: $\dot{Z} = R + jX$ に電圧を加えると, 負荷で消費される電力のうち有効電力 P, 無効電力 Q は右図から

$$P = EI\cos\varphi\ ,\quad Q = EI\sin\varphi\ ,\ \varphi = \tan^{-1}\frac{X}{R}$$

右図の基準ベクトルに対して $\dot{E} = \mathrm{e}^{j(\varphi+\theta)}$, $\dot{I} = \mathrm{e}^{j\theta}$ だから, 電力は $\dot{E}\,\dot{I}$ ではなく, $\bar{I}$ を使って

$$\dot{E}\,\bar{I} = EI\mathrm{e}^{j(\varphi+\theta)}\,\mathrm{e}^{-j\theta} = EI\mathrm{e}^{j\varphi} = EI\cos\varphi + jEI\sin\varphi$$

$$= P + jQ$$

と計算する。$\dot{E}\,\bar{I}$ を複素電力といい $\dot{S}$ で表す。

複素電力: $\dot{S} = P + jQ = \dot{E}\,\bar{I}$

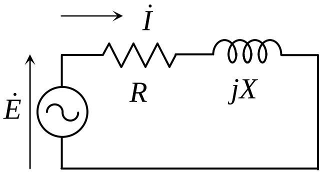
Q が正:遅れ無効電力(電流が電圧より遅れ)

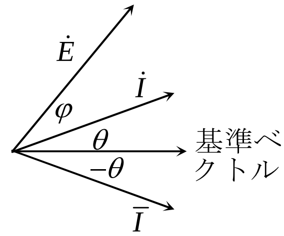
Q が負:進み無効電力(電流が電圧より進み

$\bar{E}\,\dot{I}$ を使う場合は遅れ無効電力が負になる。

$$\bar{E}\,\dot{I} = EI\mathrm{e}^{-\mathrm{j}(\varphi+\theta)}\,\mathrm{e}^{\mathrm{j}\theta} = EI\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\varphi} = EI\cos\varphi - \mathrm{j}EI\sin\varphi$$

$$= P - \mathrm{j}Q$$





なお, $\dot{E}\,\dot{I}$ は電力に一致しない。

$$\dot{E}\,\dot{I} = EI\mathrm{e}^{j(\varphi+\theta)}\,\mathrm{e}^{j\theta} = EI\mathrm{e}^{j(\varphi+2\theta)}$$

$$= EI\cos(\varphi+2\theta) + jEI\sin(\varphi+2\theta)$$

また $\dot{E} = \dot{Z}\dot{I}$, $\dot{I} = \dot{Y}\dot{E}$ なので,

$$\dot{S} = \dot{E}\bar{I} = \dot{Z}\dot{I}\,\bar{I} = \dot{Z}\,I^2\ ,\ \dot{S} = \dot{E}\,\bar{Y}\,\bar{E} = \bar{Y}\,E^2$$

複素電力の絶対値を皮相電力といい

$$S = \left|\dot{E}\,\bar{I}\right| = EI = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

三相電力はダッシュをつけて,

$\dot{S}' = 3\dot{S},\ P' = 3P,\ Q' = 3Q$, ($V = \sqrt{3}E$)

3.2 送受電端電圧と送電電力

線路の等価回路が $R + \mathrm{j}X$ である場合, 右図より送受電端の相電圧は $\dot{E}_s = \dot{E}_r + (R + \mathrm{j}X)\,\dot{I}$

φ :受電端の力率角

θ : $\dot{E}_s, \dot{E}_r$ の相差角

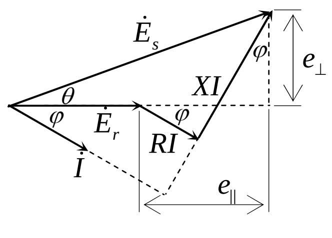
$e_{\parallel} = E_s\cos\theta - E_r = RI\cos\varphi + XI\sin\varphi$ ①

$e_{\perp} = E_s\sin\theta = XI\cos\varphi - RI\sin\varphi$ ②

θ :小のときは①より,

$E_s \simeq E_r + (R\cos\varphi + X\sin\varphi)I$ ③

送電端 受電端 電圧降下(実際は小さい値)。



電圧降下率(θ :小のとき)

$$\varepsilon[\%] = \frac{E_s - E_r}{E_r}\times 100 = \frac{(R\cos\varphi + X\sin\varphi)I}{E_r}\times 100$$

電力損失: $P_L = RI^2$

①②を電力を使って書き換えると

有効電力: $P_r = E_r I\cos\varphi$,

無効電力: $Q_r = E_r I\sin\varphi$ なので,

$$E_s\sin\theta = X\frac{P_r}{E_r} - R\frac{Q_r}{E_r} \qquad ④$$

$$E_s\cos\theta = E_r + R\frac{P_r}{E_r} + X\frac{Q_r}{E_r} \qquad ⑤$$

θ : 小のときは

$$E_s\theta \simeq \frac{XP_r - RQ_r}{E_r} \qquad ④'$$

$$E_s \simeq E_r + \frac{RP_r + XQ_r}{E_r} \qquad ⑤'$$

三相線路では線間電圧で表すので, $V = \sqrt{3}E$, $3P = P'$, $3Q = Q'$ の関係から, ③式, ⑤'式は

$$V_s \simeq V_r + \sqrt{3}(R\cos\varphi + X\sin\varphi)I$$

$$V_s \simeq V_r + \frac{RP_r' + XQ_r'}{V_r}$$

となり, 一相分と同じ形で, 負荷力率の関数。

また線路抵抗が無視できれば, $R = 0$ だから, ④, ⑤式は

$$E_s\sin\theta = X\frac{P_r}{E_r} \qquad ④''$$

$$E_s\cos\theta = E_r + X\frac{Q_r}{E_r} \qquad ⑤''$$

三相分に直すと

$P_r' = \dfrac{V_s V_r}{X}\sin\theta$ となる。 ⑥ 相差角の関数

$$Q_r' = \frac{V_r}{X}(V_s\cos\theta - V_r) \qquad ⑦$$

なお, 電力損失を受電端電力を使って表すと,

$$P_L = RI^2 = RI^2(\cos^2\varphi + \sin^2\varphi) = R\frac{P_r^2 + Q_r^2}{E_r^2}$$

より, E_r , P_r が一定の時は, $Q_r = 0$ のときに伝送損失は最小

送電電力の計算

受電端の相電圧 $\dot{E}_r$ を基準にすると

$E_s e^{\mathrm{j}\theta} = E_r + (R + \mathrm{j}X)\dot{I}$ より,

$$\dot{I} = \frac{E_s e^{\mathrm{j}\theta} - E_r}{R + \mathrm{j}X} = \frac{E_s e^{\mathrm{j}(\theta-\varphi)} - E_r e^{-\mathrm{j}\varphi}}{Z} \qquad ⑧$$

ここで $R + jX = Ze^{\mathrm{j}\phi}, \phi = \tan^{-1}\dfrac{X}{R}, Z = \sqrt{R^2 + X^2}$

受電端の複素電力を $\dot{S}_r$, 共役を $\overline{S}_r$ とすると

$$\dot{S}_r = \dot{E}_r\overline{I} = P_r + jQ_r = E_r\frac{E_s e^{-j(\theta-\phi)} - E_r e^{j\phi}}{Z} \qquad ⑨$$

三相分は $\dot{S}_r' = 3\dot{E}_r\overline{I} = P_r' + jQ_r'$, だから

$$\dot{S}_r' = 3E_r\left(\frac{E_s}{Z}e^{-\mathrm{j}(\theta-\phi)} - \frac{E_r}{Z}e^{j\phi}\right)$$

$$= \frac{3E_r E_s}{Z}e^{-\mathrm{j}(\theta-\phi)} - \frac{3E_r^2}{Z}e^{j\phi}$$

$V_s = \sqrt{3}E_s$, $V_r = \sqrt{3}E_r$ を代入すると

$$\dot{S}_r' = \frac{V_r V_s}{Z}e^{-j(\theta-\phi)} - \frac{V_r^2}{Z}e^{j\phi}$$

$$= \frac{V_r V_s}{Z}\cos(\theta-\phi) - \frac{V_r^2}{Z}\cos\phi$$

$$+ j\left(-\frac{V_r V_s}{Z}\sin(\theta-\varphi) - \frac{V_r^2}{Z}\sin\varphi\right)$$

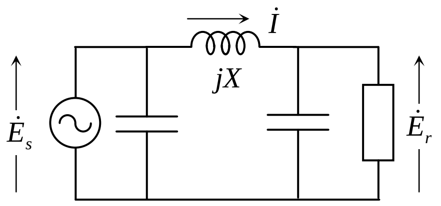
線路抵抗が無視: $R = 0$ できれば $\phi = \pi/2$, $Z = X$ だから

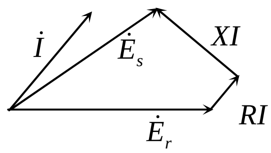
$P_r' = \dfrac{V_s V_r}{X}\cos\left(\theta - \dfrac{\pi}{2}\right) = \dfrac{V_s V_r}{X}\sin\theta$ となる。 ⑥と同じ

$$Q_r' = -\frac{V_s V_r}{X}\sin\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right) - \frac{V_r^2}{X} = \frac{V_r}{X}(V_s\cos\theta - V_r) \qquad ⑦$$

3.3 フェランチ現象

軽負荷時に送電線の静電容量の影響で受電端電圧が送電端電圧よりも上昇する現象





(a) 夜間の系統運転時

(b) 受電端を開放した場合

*受電端に並列リアクトルを接続する等の対策

3.4 単位法（または PU 法）

定格の異なる機器の，電圧，電流，有効・無効電力，インピーダンス，アドミタンスの値を，系統に適した基準値（$_{\mathrm{B}}$:ベースの添え字をつける）に対する比として無次元化する方法のこと。

単位法は複雑な電力回路の解析に便利である。ただし求められる値は全て「比」なので，基準量をかけて元の単位に戻す必要がある。

3.4.1 基準値と pu 値

電圧の表し方V_{B}，E_{B} :基準値（定格値）とすると

線間電圧V の pu 値は: $V_{\mathrm{pu}} = \dfrac{V}{V_{\mathrm{B}}}$

相電圧E の pu 値は: $E_{\mathrm{pu}} = \dfrac{E}{E_{\mathrm{B}}}$

線間電圧と相電圧: $V = \sqrt{3}E$ だから

$$E_{\mathrm{pu}} = \frac{E}{E_{\mathrm{B}}} = \frac{\sqrt{3}V}{\sqrt{3}V_{\mathrm{B}}} = V_{\mathrm{pu}}$$

単位法では線間電圧と相電圧は等しい

例）$V_{\mathrm{B}} = 275\ \mathrm{kV}$ で，電圧 285 kV は

285/275＝1.036pu

<u>単相回路または平衡三相回路の1相分</u>

基準値：相電圧と1相分容量

基準電圧：相電圧 E_{B} [V]

基準容量：1相分容量 S_{B} [VA]

基準電流，基準インピーダンスを定義：

基準電流： $I_{\mathrm{B}} = \dfrac{S_{\mathrm{B}}}{E_{\mathrm{B}}}$ [A]

基準インピーダンス： $Z_{\mathrm{B}} = \dfrac{E_{\mathrm{B}}}{I_{\mathrm{B}}} = \dfrac{E_{\mathrm{B}}{}^2}{S_{\mathrm{B}}}$ [Ω]

pu 値（基準値を用いるた pu 表示）：

pu インピーダンス： $Z_{\mathrm{pu}} = \dfrac{\dot{Z}}{Z_{\mathrm{B}}} = \dfrac{I_{\mathrm{B}}}{E_{\mathrm{B}}}\dot{Z} = \dfrac{S_{\mathrm{B}}}{E_{\mathrm{B}}{}^2}\dot{Z}$

$$Y_{\mathrm{pu}} = \frac{1}{Z_{\mathrm{pu}}} = \frac{E_{\mathrm{B}}{}^2}{S_{\mathrm{B}}}\dot{Y}$$

任意の容量 S [VA]，電圧 $\dot{E}$ [V]，電流 $\dot{I}$ [A]

$S_{\mathrm{pu}} = \dfrac{S}{S_{\mathrm{B}}}$，$E_{\mathrm{pu}} = \dfrac{\dot{E}}{E_{\mathrm{B}}}$，$I_{\mathrm{pu}} = \dfrac{\dot{I}}{I_{\mathrm{B}}}$ （無次元）

<u>3 相回路</u>　（3相容量はダッシ表示）

基準値：線間電圧と三相分容量

基準電圧：線間電圧 V_{B} [V]

基準容量：三相分容量 $S'_{\mathrm{B}} = 3S_{\mathrm{B}}$ [VA]

基準電流，基準インピーダンスを定義：

基準電流：$I_{\mathrm{B}} = \dfrac{S_{\mathrm{B}}}{E_{\mathrm{B}}} = \dfrac{S'_{\mathrm{B}}/3}{V_{\mathrm{B}}/\sqrt{3}} = \dfrac{S'_{\mathrm{B}}}{\sqrt{3}V_{\mathrm{B}}}$ [A]

基準インピーダンス：$Z_{\mathrm{B}} = \dfrac{E_{\mathrm{B}}}{I_{\mathrm{B}}} = \dfrac{E_{\mathrm{B}}{}^2}{S_{\mathrm{B}}} = \dfrac{V_{\mathrm{B}}{}^2}{S'_{\mathrm{B}}}$ [Ω]

$Z_{\mathrm{B}} = \dfrac{V_{\mathrm{B}}{}^2}{S'_{\mathrm{B}}}$ と $S'_{\mathrm{B}} = \sqrt{3}V_{\mathrm{B}}I_{\mathrm{B}}$ より，4 基準値 V_{B}，S'_{B}，I_{B}，Z_{B} のうち 2 つがわかると他の 2 つが求まる。

$\dot{Z}$ の pu インピーダンス表示は

$$Z_{\mathrm{pu}} = \frac{\dot{Z}}{Z_{\mathrm{B}}} = \frac{S_{\mathrm{B}}}{E_{\mathrm{B}}{}^2}\dot{Z} = \frac{S'_{\mathrm{B}}}{V_{\mathrm{B}}{}^2}\dot{Z}$$

三相回路では，線間電圧と三相分容量を用いると Z_{pu} の表示は単相分と同じ。

<u>電力</u>

基準三相容量を $S'_{\mathrm{B}} = 3S_{\mathrm{B}}$ とすれば，

三相電力 P[W]は：$P_{\mathrm{pu}} = \dfrac{P}{S'_{\mathrm{B}}}$

三相無効電力 Q[var]は：$Q_{\mathrm{pu}} = \dfrac{Q}{S'_{\mathrm{B}}}$

三相皮相電力 Q[VA]は：$S_{\mathrm{pu}} = \dfrac{S}{S'_{\mathrm{B}}}$

3.4.2 パーセント法：pu 値を 100 倍した値

％法は[W][V]の単位無しに計算できることが特徴。ただし電圧×電流を求める場合は右のように，10000 倍となり 10^2 の係数が必要となる。

単位法：$E_{\mathrm{pu}}I_{\mathrm{pu}} = \dfrac{E}{E_{\mathrm{B}}}\dfrac{I}{I_{\mathrm{B}}} = \dfrac{S}{S_{\mathrm{B}}} = S_{\mathrm{pu}}$

％法：

$$E_{\%}\cdot I_{\%} = E_{\mathrm{pu}}\times 100\cdot I_{\mathrm{pu}}\times 100$$

$$= \left(\frac{E}{E_{\mathrm{B}}}\times 100\right)\left(\frac{I}{I_{\mathrm{B}}}\times 100\right)$$

$$= \frac{S}{S_{\mathrm{B}}}\times 10^4 = S_{\mathrm{pu}}\times 100\times 10^2 = S_{\%}\times 10^2$$

3.4.3 ％インピーダンスの基準値の変換

インピーダンスは％表示して，％（パーセント）インピーダンスと呼ぶ。発電機や変圧器などの電力機器銘板には，定格電圧，定格容量を基準とした％インピーダンスが表示されている。

実際のインピーダンスが $\dot{Z}$ [Ω]の電力機器について，定格電圧 E_{R} [kV]，定格容量 S_{R} [MVA]に対する％インピーダンスが $Z_{\mathrm{R}\%}$ とすると：

$Z_{\mathrm{R}\%} = Z_{\mathrm{Rpu}}\times 100 = \dfrac{S_{\mathrm{R}}}{E_{\mathrm{R}}{}^2}\dot{Z}\times 100$　となる。

この機器を基準電圧 E_{B} [kV]，基準容量 S_{B} [MVA]の系統で使用した場合の％インピーダンスは　$Z_{\mathrm{B}\%} = \dfrac{S_{\mathrm{B}}}{E_{\mathrm{B}}{}^2}\dot{Z}\times 100$ だから，$Z_{\mathrm{R}\%}$ を使って

$\dot{Z}$ を消去すると，　$Z_{\mathrm{B}\%} = Z_{\mathrm{R}\%}\dfrac{S_{\mathrm{B}}}{S_{\mathrm{R}}}\left(\dfrac{E_{\mathrm{R}}}{E_{\mathrm{B}}}\right)^2$。

同じ系統電圧ならば容量比のみで求めることができる。

例題1：　抵抗が 10 Ω, リアクタンスが 40 Ωの 154 kV 送電線がある，いま，154 kV，10 MVA を基準としてこの送電線の％インピーダンスを求め，％インピーダンス図を描け。

$Z_{\mathrm{pu}} = \dfrac{S'_{\mathrm{B}}}{V_{\mathrm{B}}{}^2}\dot{Z}$ より $10\dfrac{10\mathrm{M}}{(154\,\mathrm{k})^2}\times 100 = 0.42$ ％，$40\dfrac{10\mathrm{M}}{(154\,\mathrm{k})^2}\times 100 = 1.69$ ％，よって，$Z_{\%} = 0.42 + \mathrm{j}1.69$