

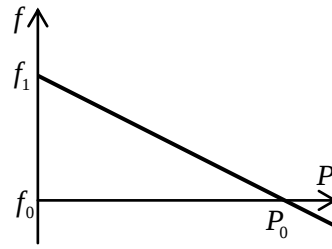
周波数制御と電圧制御の比較

周波数 f は回転数 N に対応する。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

周波数制御: $\Delta P \sim \Delta f$, 電圧制御は $\Delta Q \sim \Delta V$ の調整である。両者の相違点は

- 1) 系統が連携されているときの周波数は、系統内のどこでも同一なので、有効電力の制御は系統内のどこにおいても可能
- 2) 電圧は系統内の各地点によって異なるので、電圧制御の効果は局所的

- 3) 有効電力の制御には燃料費などのコストがかかる、無効電力制御は設備を一旦導入すればコストはかからない
- 4) 周波数制御は $\pm 0.2\%$ 、母線電圧の制御は $\pm$ 数%
- 5) 無効電力の要求は昼夜で極性が逆転する場合がある(地中ケーブル等の影響)

3.7 経済運用

多種多様な発電機の負荷配分を選定して、最も経済的な運用を行うこと。経済負荷配分ともいう。単位時間に消費する燃料代を燃料費 F [¥/h],

1 kWh の電気エネルギーを作り出すのに必要な燃料費を燃料消費率 C [¥/kWh], 発電機出力 P [kW] とすると次の関係がある。 $C = \frac{F}{P}$ [¥/kWh]。

一般に、発電機の燃料消費率は定格出力近辺で最小となり、出力が大きくなると小さくなる。電力系統では、全発電機の合計出力 P_D の需給平衡の元で、燃料費の合計 F_T を最小化するように運用する。すなわち、 $P_D = P_1 + P_2 + \dots + P_N = \sum_{i=1}^N P_i$, $F_T = F_1(P_1) + F_2(P_2) + \dots + F_N(P_N) = \sum_{i=1}^N F_i(P_i)$ より未定係数 λ を導入して

$$\phi = \sum_{i=1}^N F_i(P_i) + \lambda \left(P_D - \sum_{i=1}^N P_i \right) \text{ を最小化。}$$

2 台の発電機からなる系統の場合目的関数 ϕ は、 $\phi = F_1(P_1) + F_2(P_2) + \lambda(P_D - P_1 - P_2)$ よ

り、

$$\frac{\partial \phi}{\partial P_i} = 0 \rightarrow \frac{\partial F_1(P_1)}{\partial P_1} - \lambda = 0, \frac{\partial F_2(P_2)}{\partial P_2} - \lambda = 0,$$

ここで、 $\frac{\partial F_i(P_i)}{\partial P_i}$ を増分燃料費と呼ぶ。よって、

合計燃料費を最小化するには、各発電機の増分燃料費を等しくすればよい。これを等増分燃料費則という。

$$\frac{\partial F_i(P_i)}{\partial P_i} = \lambda \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

第4章：故障計算

電力系統での故障の形態

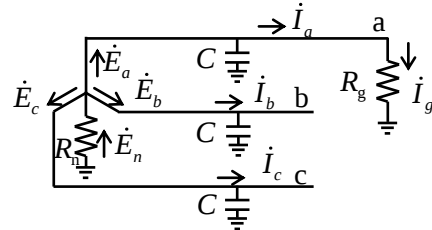
設備事故：発電所，送電線路，変電所，配電線路(>90%)，需要家設備

故障要因：自然現象(>50%)，他物接触，保守不備，作業者過失，設備不備，その他
送電線路での事故は，ほとんどが1線地絡

4.1 テブナンの定理による1線地絡故障計算

1線地絡が起こる前について，a点の対地電位を $\dot{E}_a = E$ とおくと，a点からみた電源側のインピーダンス $\dot{Z}_0$ は，

$$\dot{Z}_0 = \frac{1}{\frac{1}{R_n} + j3\omega C} = \frac{R_n}{1 + j3\omega CR_n}$$



R_g は1線地絡抵抗を表す。

地絡電流 $\dot{I}_g$ は，テブナンの定理より

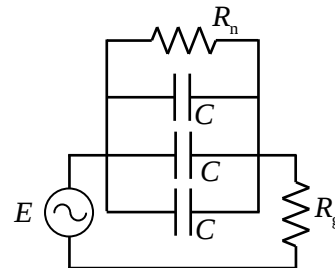
$$\dot{I}_g = \frac{E}{\frac{R_n}{1 + j3\omega CR_n} + R_g} = \frac{E(1 + j3\omega CR_n)}{R_n + R_g + j3\omega CR_n R_g}$$

中性点が非接地の場合は， $R_n = \infty$ なので

$$\dot{I}_g = \frac{E(1 + j3\omega CR_n)}{R_n + R_g + j3\omega CR_n R_g} \bigg|_{R_n = \infty} = \frac{j3\omega CE}{1 + j3\omega CR_g}$$

$\dot{E}_n + \dot{E}_a = \dot{I}_g R_g$ より中性点電位は，

$\dot{E}_n = \dot{I}_g R_g - \dot{E}_a$ となり，0では無くなる。



よって，事故時の各相の電圧は，

$$\dot{E}'_a = E_a + \dot{E}_n$$

$$\dot{E}'_b = \dot{E}_b + \dot{E}_n = \alpha^2 E_a + \dot{E}_n$$

$$\dot{E}'_c = \dot{E}_c + \dot{E}_n = \alpha E_a + \dot{E}_n$$

テブナンの定理(回路理論基礎 P15)

多数の電源を含む回路に負荷抵抗 R_L をつないだ時に得られる出力電圧 V_0 は，負荷を開放したときの開放電圧 V_f と電源を除いた受動回路の内部抵抗 R_0 から次式で求められる。

$$V_0 = \frac{R_L}{R_0 + R_L} V_f, \quad I_0 = \frac{V_f}{R_0 + R_L}$$

I_0 は R_L に流れる電流。

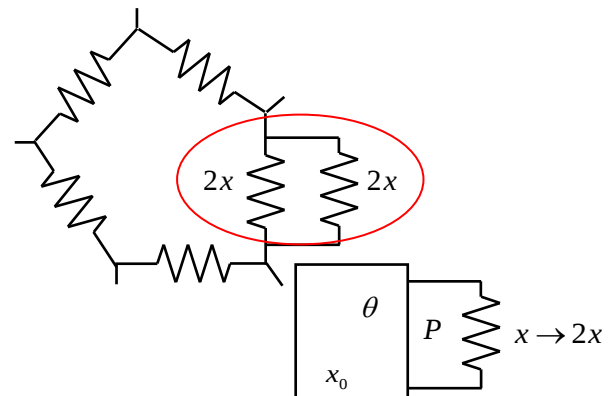
ループ内系統変更時の潮流変動

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 $\theta_i - \theta_j = X_{ij} P_{ij}$ に変化。直流法より，

$\theta_{ij} \rightarrow V, X_{ij} \rightarrow R, P_i \rightarrow I$ とすればテブナンの

の定理から，初期状態は： $P_0 = \frac{\theta}{x_0 + x}$ ，変更

後は $P_1 = \frac{\theta}{x_0 + 2x}$ ，よって $P_1 = \frac{x_0 + x}{x_0 + 2x} P_0$



4.2 3相対称座標法

3 相不平衡電圧や電流を、零相、正相、逆相の対称分に分けて取り扱う方法のこと。

(3 相対称座標法はフォーテスキューが提案)

1 線地絡や断線故障がおこると非対称電流や電圧が発生し、対称 3 相交流の扱いができなくなる。このため、3 相回路各相の電圧 $\dot{E}_a, \dot{E}_b, \dot{E}_c$ および電流 $\dot{I}_a, \dot{I}_b, \dot{I}_c$ を別の座標系に変数変換 ($\dot{E}_0, \dot{E}_1, \dot{E}_2, \dot{I}_0, \dot{I}_1, \dot{I}_2$) し、その座標系で計算した結果を、もとの座標系に逆変換する手法が使われる。

対称座標法での電圧・電流は次の特長がある

- ・零相 (0) : 各相とも大きさが等しく、同じ位相
- ・正相 (1) : 各相とも大きさが等しく、位相が $a \rightarrow b \rightarrow c$ の順に、 $2\pi/3$ (120°) ずつ遅れている対称三相交流
- ・逆相 (2) : 各相とも大きさが等しく、位相が $a \rightarrow c \rightarrow b$ の順に、 $2\pi/3$ ずつ遅れている対称三相交流

対称三相交流電圧

$$\dot{E}_a = E e^{j\omega t}, \dot{E}_b = E e^{j(\omega t - \frac{2}{3}\pi)}, \dot{E}_c = E e^{j(\omega t + \frac{2}{3}\pi)}$$

$$\rightarrow \dot{E}_a = E, \dot{E}_b = \alpha^2 E, \dot{E}_c = \alpha E$$

ベクトルオペレータ: α ,

$$\alpha = e^{j\frac{2}{3}\pi} = e^{-j\frac{4}{3}\pi} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2},$$

$$\alpha^2 = e^{j\frac{4}{3}\pi} = e^{-j\frac{2}{3}\pi} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2},$$

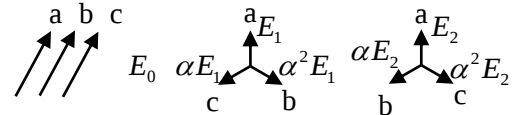
$$1 + \alpha + \alpha^2 = 0, \alpha^3 = 1$$

対称成分は ($\dot{E}_a, \dot{E}_b, \dot{E}_c$ は対称とは限らない)

$$\dot{E}_0 = \frac{1}{3}(\dot{E}_a + \dot{E}_b + \dot{E}_c)$$

$$\dot{E}_1 = \frac{1}{3}(\dot{E}_a + \alpha \dot{E}_b + \alpha^2 \dot{E}_c)$$

$$\dot{E}_2 = \frac{1}{3}(\dot{E}_a + \alpha^2 \dot{E}_b + \alpha \dot{E}_c)$$



零相

正相

逆相

零相: 各相同じの位相差のない電圧

正相: 正の相回転をする対称 3 相電圧

逆相: 負の相回転をする対称 3 相電圧

電流についても同様に非対称な 3 相交流を対称成分に変換

$$\dot{I}_0 = \frac{1}{3}(\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c)$$

$$\dot{I}_1 = \frac{1}{3}(\dot{I}_a + \alpha \dot{I}_b + \alpha^2 \dot{I}_c)$$

$$\dot{I}_2 = \frac{1}{3}(\dot{I}_a + \alpha^2 \dot{I}_b + \alpha \dot{I}_c)$$

零相、正相、逆相の電圧を求め、逆変換して、最終的に非対称 3 相電圧・電流を求める

逆変換の式:

$$\dot{E}_a = \dot{E}_0 + \dot{E}_1 + \dot{E}_2$$

$$\dot{E}_b = \dot{E}_0 + \alpha^2 \dot{E}_1 + \alpha \dot{E}_2$$

$$\dot{E}_c = \dot{E}_0 + \alpha \dot{E}_1 + \alpha^2 \dot{E}_2$$

$$\dot{I}_a = \dot{I}_0 + \dot{I}_1 + \dot{I}_2$$

$$\dot{I}_b = \dot{I}_0 + \alpha^2 \dot{I}_1 + \alpha \dot{I}_2$$

$$\dot{I}_c = \dot{I}_0 + \alpha \dot{I}_1 + \alpha^2 \dot{I}_2$$