

第5章：系統故障の影響と対策

5.1 1線地絡時の電圧上昇

無負荷発電機の一線地絡故障で導いた結果から、送電線でも同様に(11回資料参照)

故障点から見た系統の対称分インピーダンスを

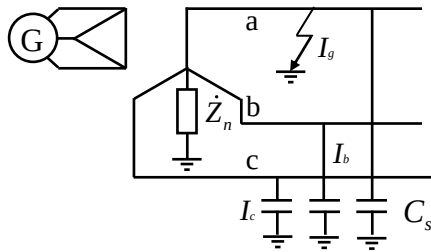
$\dot{Z}_0, \dot{Z}_1, \dot{Z}_2$ とすれば

$$\dot{V}_a = \dot{V}_0 + \dot{V}_1 + \dot{V}_2 = 0$$

$$\dot{V}_b = \dot{V}_0 + \alpha^2 \dot{V}_1 + \alpha \dot{V}_2 = \frac{(\alpha^2 - 1)\dot{Z}_0 + (\alpha^2 - \alpha)\dot{Z}_2}{\dot{Z}_0 + \dot{Z}_1 + \dot{Z}_2} \dot{E}_a$$

$$\dot{V}_c = \dot{V}_0 + \alpha \dot{V}_1 + \alpha^2 \dot{V}_2 = \frac{(\alpha - 1)\dot{Z}_0 + (\alpha - \alpha^2)\dot{Z}_2}{\dot{Z}_0 + \dot{Z}_1 + \dot{Z}_2} \dot{E}_a$$

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



通常、 $\dot{Z}_1 = \dot{Z}_2 = jX_1$, $\dot{Z}_0 = R_0 + jX_0$ とおける。

$\dot{Z}_0$ は対地静電容量と中性点インピーダンス(接地抵抗なども含めた零相回路)の和

$$\frac{\dot{V}_b}{\dot{E}_a} = \alpha - j\left(\frac{\sqrt{3}}{2} - \beta\right), \quad \frac{\dot{V}_c}{\dot{E}_a} = \alpha + j\left(\frac{\sqrt{3}}{2} + \beta\right)$$

$$\alpha = -\frac{3}{2} \frac{(R_0/X_1)^2 + (X_0/X_1)\{(X_0/X_1) + 2\}}{(R_0/X_1)^2 + \{(X_0/X_1) + 2\}^2}$$

$$\beta = \frac{(3R_0/X_1)}{(R_0/X_1)^2 + \{(X_0/X_1) + 2\}^2}$$

このため a 相地絡の場合は、通常 c 相の電圧上昇の方が b 相よりも大きい。

中性点非接地では、 $X_0 < 0$

低リアクタンスで接地すると、 $X_0 > 0$

直接接地すると、

$\frac{X_0}{X_1}$ を横軸にとり、 $\frac{R_0}{X_1}$ をパラメータとして、

$\left|\frac{\dot{V}_c}{\dot{E}_a}\right|$ の値をプロットすると右図

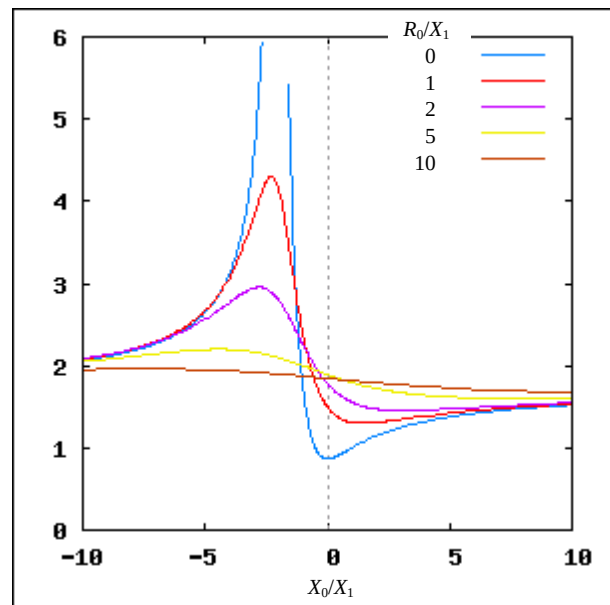
$R_0 = 0$, $X_0 = 0$ 近傍で c 相(健全相)の電圧上昇割合が小であるので、直接接地が有効。

$\frac{R_0}{X_1} \leq 1$, $0 \leq \frac{X_0}{X_1} \leq 3$ では $\left|\frac{\dot{V}_c}{\dot{E}_a}\right| \leq 1.4$ である。

電圧上昇を平常時の対地電圧の 1.4 倍以内に制限する条件の接地のことを**有効接地**とよぶ

$\frac{X_0}{X_1} = -2$ で電圧上昇率大、この条件は

$X_0 + 2X_1 = X_0 + X_1 + X_2 = 0$ 。非接地系のように中性点抵抗が $\dot{Z}_n \approx \infty$ の場合は、送電線対地静電容量による零相回路のキャパシタンスと共振状態となって非常に高い電圧が出る。



短距離送電線で、 $R_0 \approx 0$, $X_0 \approx 0$ と見なせる場合は、電圧上昇は小さい。また正相、逆相インピーダンスの抵抗分を考慮すると、電圧上昇率は低下する。(ここでの R_0 は零相回路の抵抗分で、中性点インピーダンスそのものではない、接地抵抗など)

5.2 中性点接地方式

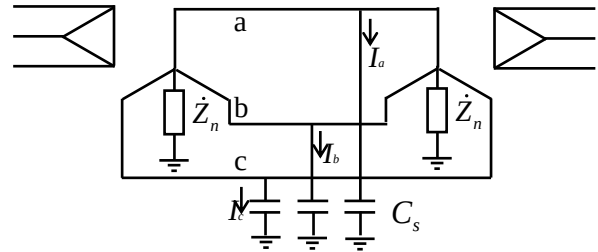
中性点接地の特長

- ・健全相の対地電圧上昇抑制
- ・機器の絶縁保護レベル緩和
- ・地絡電流検出による保護継電器の確実動作
- ・消弧リアクトル接地方式では、地絡電流（アーク放電）を直ちに消滅させて送電を継続

中性点接地の欠点

- ・地絡電流増加
- ・誘導障害発生

- 種類
- ・ 非接地方式 $Z_n = \infty$
 - ・ 抵抗接地方式 $Z_n = R$
 - ・ 直接接地方式 $Z_n \approx 0$
 - ・ 消弧リアクトル接地方式 $Z_n = jX_L$



直接接地方式

- ・直接接地: 187kV 以上の送電系統で広く採用
- 地絡電流が大きく保護継電器が確実動作
- 故障時の健全相の対地電圧上昇はほぼ 0
- ×地絡電流が大きく誘導障害が大
- ×大電流遮断が必要

抵抗接地方式

- ・154kV 以下の送電系統に広く利用
- 抵抗値: 220 kV: 30 Ω, 154kV: 400~900 Ω, 66kV: 200~400 Ω
- 誘導障害の軽減
- 故障電流の制限, 過渡安定度の向上
- ×地絡電流の減少により検出感度低下
- ×1線地絡故障時の健全相対地電圧は $\sqrt{3}$ 倍以上

消弧リアクトル接地方式

- ・66~154kV 系統で主に雷の多発地域で使用 (高価, タップ選択煩雑, 最近では採用が少)
- 対地静電容量大でも一線地絡電流小
- アークが消弧し易く自動的に故障が回復する
- 送電の継続が可能, 電磁誘導障害小,

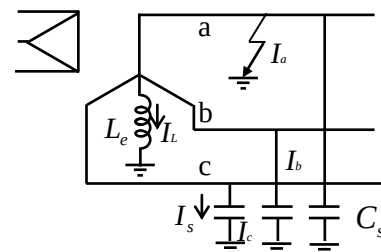
- ×対地静電容量が変更になるとリアクタンス値を変更する必要がある
- ×地絡電流小のため地絡継電器の動作困難
- ×施設費が高い
- ×断線故障などで異常電圧発生,

消弧リアクトル接地方式の原理

送電線 1 線と対地間の静電容量の 3 倍と並列共振になるリアクトルで接地する方式 $1/\omega L_e = 3\omega C_s$
 対称座標法の結果より, a 相での 1 線地絡 I_a は

$$\dot{I}_a = \frac{3\dot{E}_a}{Z_0 + Z_1 + Z_2} = \frac{3\dot{E}_a}{\left((j\omega 3L_e)^{-1} - \left(\frac{3}{j3\omega C_s} \right)^{-1} \right)^{-1}}$$

$$= \left(j\omega C_s + \frac{1}{j\omega 3L_e} \right) 3\dot{E}_a = j \left(3\omega C_s - \frac{1}{\omega L_e} \right) \dot{E}_a$$



なお, 零相インピーダンスは対地容量と共振用リアクトルの並列インピーダンスを 3 倍した。

$\frac{1}{\omega L_e} = 3\omega C_s$ のとき地絡電流 $I_a = 0$ となる。

非接地方式

- 6.6kV の配電系統, 30kV 以下の小規模系統
- 地絡電流小のため誘導障害小,
- 地絡時に送電系統継続可能, 変圧器を Δ 結線にできるため Y 結線でも送電継続可能
- 施設費が少ない

中性点残留電圧

中性点非接地系統では, 各送電線の静電容量が等しくない場合は, 中性点に電圧が発生。

各静電容量を流れる電流は

$$\dot{I}_a = j\omega C_a (\dot{E}_a + \dot{E}_n)$$

$$\dot{I}_b = j\omega C_b (\dot{E}_b + \dot{E}_n)$$

$$\dot{I}_c = j\omega C_c (\dot{E}_c + \dot{E}_n)$$

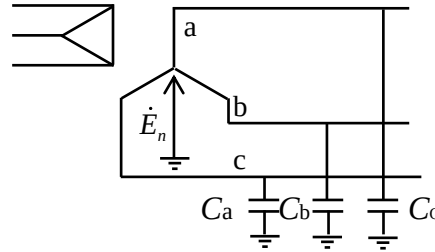
非接地だから $\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c = 0$ 。よって,

$$\dot{E}_n (C_a + C_b + C_c) + C_a \dot{E}_a + C_b \dot{E}_b + C_c \dot{E}_c = 0$$

$$\dot{E}_n = -\frac{C_a \dot{E}_a + C_b \dot{E}_b + C_c \dot{E}_c}{C_a + C_b + C_c}, \text{ また}$$

$$\dot{E}_a = E, \dot{E}_b = \alpha^2 E, \dot{E}_c = \alpha E \text{ とおけば}$$

- × 線路の対地静電容量の影響が大,
- × 異常電圧の発生が起りやすい,
- × 高圧送電系統には使えない



$$\dot{E}_n = -\frac{C_a + \alpha^2 C_b + \alpha C_c}{C_a + C_b + C_c} E \text{ より,}$$

$$E_n = |\dot{E}_n| = \frac{\sqrt{C_a(C_a - C_b) + C_b(C_b - C_c) + C_c(C_c - C_a)}}{C_a + C_b + C_c} E$$

66kV 系では 50~500V 程度。

5.3 第3高調波と中性点接地

変圧器に使われる鉄心の B-H 特性によって, 正弦波の励磁電流がながれた場合に誘起される磁束は, 第3高調波成分を含む。

磁束: $\phi = \alpha i - \beta i^3$, 電流: $i = I_m \sin \omega t$ とすると

$$\phi = \alpha I_m \sin \omega t - \beta I_m^3 \sin^3 \omega t$$

$$= \frac{(4\alpha I_m - 3\beta I_m^3)}{4} \sin \omega t + \frac{\beta}{4} I_m^3 \sin 3\omega t$$

よって, 出力電圧 ($d\phi/dt$) には第3高調波が含まれる。基本波電圧 E_1 を, 第3高調波電圧を E_3 とすると両者を含む3相起電力は

$$e_a = \sqrt{2}E_1 \sin \omega t + \sqrt{2}E_3 \sin 3\omega t$$

$$e_b = \sqrt{2}E_1 \sin(\omega t - \frac{2}{3}\pi) + \sqrt{2}E_3 \sin 3(\omega t - \frac{2}{3}\pi)$$

$$= \sqrt{2}E_1 \sin(\omega t - \frac{2}{3}\pi) + \sqrt{2}E_3 \sin 3\omega t$$

$$e_c = \sqrt{2}E_1 \sin(\omega t - \frac{4}{3}\pi) + \sqrt{2}E_3 \sin 3(\omega t - \frac{4}{3}\pi)$$

$$= \sqrt{2}E_1 \sin(\omega t - \frac{4}{3}\pi) + \sqrt{2}E_3 \sin 3\omega t$$

となって, 第3高調波電圧は同相の零相成分である。

送電系統において変圧器の巻線は発電機側に Δ -Y 結線, 変圧器側に Y- Δ 結線を使う。1次側が Δ 結線ならば, 第3高調波(零相)は Δ 結線内部を還流し, 線路には流れない。1次側が Y 結線では, 2次側 Δ 回路に循環電流が流れ, 第3高調波の起電力を打ち消す。以上から, 中性点を接地した場合にも第3高調波(零相)が大地に流れることを防ぐ。

