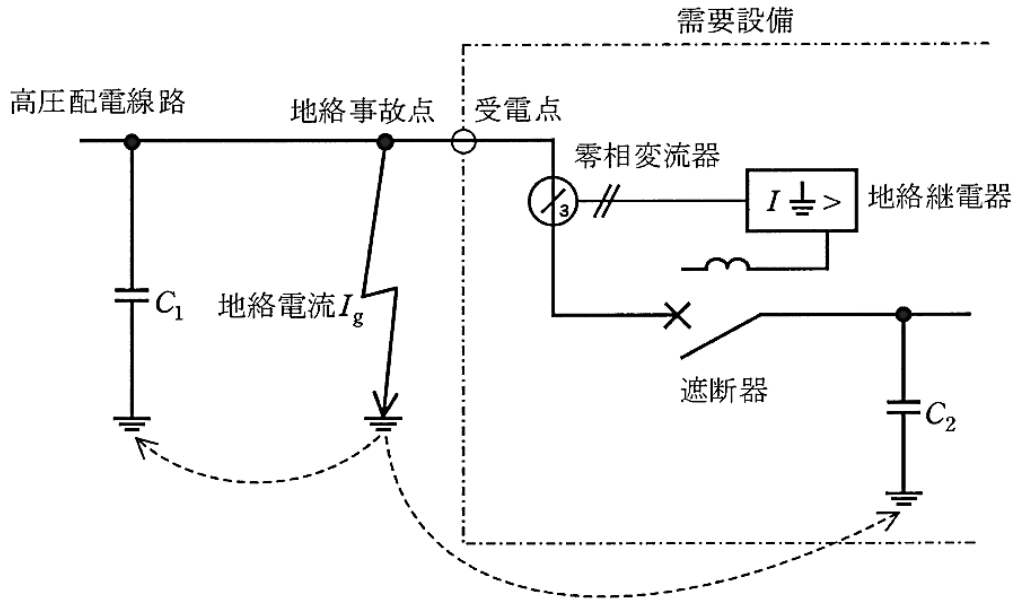


【問題】

図は、線間電圧 $V[V]$ 、周波数 $f[Hz]$ の中性点非接地方式の三相3線式高圧配電線路及びある需要設備の高圧地絡保護システムを簡易に示した単線図である。高圧配電線路一相の全対地静電容量を $C_1[F]$ 、需要設備一相の全対地静電容量を $C_2[F]$ とすると、次の(a)及び(b)に答えよ。ただし、図示されていない負荷、線路定数及び配電用変電所の制限抵抗は無視するものとする。



(a) 図の配電線路において、遮断器が「入」の状態に地絡事故点に一線完全地絡事故が発生し地絡電流 $I_g[A]$ が流れた。このとき I_g の大きさを表す式を問題文の記号を用いて示せ。ただし、間欠アークによる影響等は無視するものとし、この地絡事故によって遮断器は動作しないものとする。

(b) 上記(a)の地絡電流 I_g は高圧配電線路側と需要設備側に分流し、需要設備側に分流した電流は零相変流器を通過して検出される。上記のような需要設備構外の事故に対しても、零相変流器が検出する電流の大きさによっては地絡継電器が不必要に動作する場合がありますので注意しなければならない。地絡電流 I_g が高圧配電線路側と需要設備側に分流する割合は C_1 と C_2 の比によって決まるものとしたとき、 I_g のうち需要設備の零相検流器で検出される電流の値[mA]を求めよ。

ただし、 $V = 6600V$ 、 $f = 60Hz$ 、 $C_1 = 2.3\mu F$ 、 $C_2 = 0.02\mu F$ とする。

(出典：2016年度第3種電気主任技術者試験 法規問13改題)

【解答】

(a) 問題の単線図をテブナンの定理を使って等価回路で表す。

題意より、高圧配電線路側並びに需要設備側の全対地静電容量は一相あたりの値が示されて

いること、また、図示されていない負荷、線路定数及び配電用変電所の制限抵抗は無視することとなっているため、三相回路図は図1のとおり表せる。

ただし、 E_a, E_b, E_c [V] : 各相電圧、 R_g [Ω] : 地絡抵抗（本問では完全地絡のため0Ω）とする。

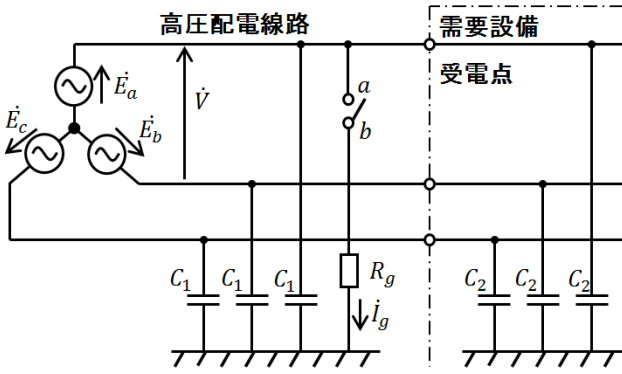


図1 三相回路図

次にテブナンの定理を適用するため、図2より内部インピーダンス Z_0 [Ω]及び開放端電圧 E_0 [V]を求める。内部インピーダンス Z_0 は、各相電圧（電源電圧）を短絡して端子abから回路全体をみた合成インピーダンスとなるため、次式で示すことができる。

$$Z_0 = \frac{1}{\omega \cdot 3C} = \frac{1}{2\pi f \cdot 3(C_1 + C_2)} \text{ [Ω]} \cdots \text{①}$$

ただし、 $\omega = 2\pi f$ [rad/s] : 角周波数

ここで、内部インピーダンス Z_0 の分母にある $3C$ は、各相の全対地静電容量が並列に接続されていると考えられるため、合成静電容量はその3倍となり、 C_1 と C_2 も並列接続となることから単純に足し算として $3(C_1 + C_2)$ として求められる。なお、地絡抵抗が R_g [Ω]の場合は次式となる。

$$Z_0 = \sqrt{R_g^2 + \left\{ \frac{1}{2\pi f \cdot 3(C_1 + C_2)} \right\}^2} \text{ [Ω]} \cdots \text{①}'$$

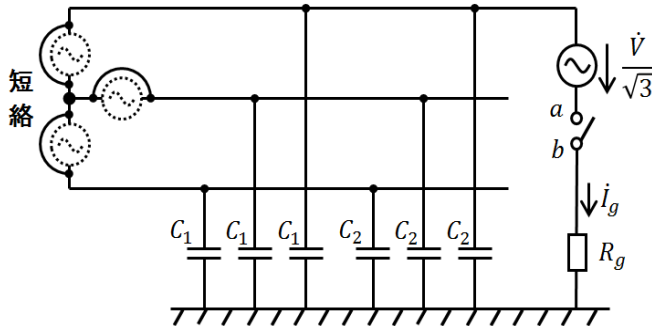


図2 Z_0 の求め方

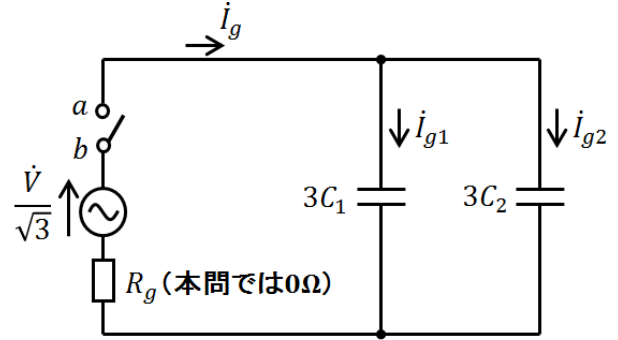


図3 等価回路

次に、端子abを開放した時の開放端電圧 E_0 は、地絡事故発生前の対地電圧となるので、

$$E_0 = \frac{V}{\sqrt{3}} \text{ [V]} \cdots \text{②}$$

以上で求めた Z_0 と E_0 から等価回路を表すと図4となり、テブナンの定理より一線地絡電流は、①、②式を用いて次式で示すことができる。

$$I_g = \frac{E_0}{Z_0} = \frac{V/\sqrt{3}}{\frac{1}{2\pi f \cdot 3(C_1 + C_2)}} \text{ [A]} \cdots \text{③}$$

$$= \frac{V \cdot 2\pi f \cdot 3(C_1 + C_2)}{\sqrt{3}}$$

$$= 2\sqrt{3}V\pi f(C_1 + C_2) \text{ [A]} \text{ (答)}$$

※テブナンの定理については、本紙「電験三種奮闘講座 理論(3)直流回路」を参照されたい。

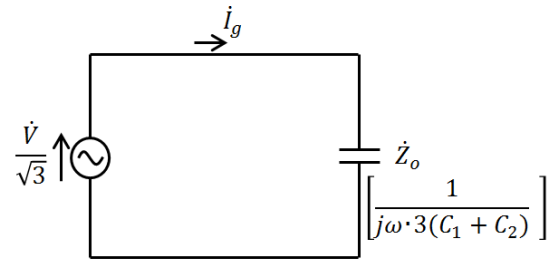


図4 テブナン等価回路

(b) 需要設備側の零相変流器で検出される電流 I_{g2} は、題意より図3の等価回路で示され、地絡電流 I_g が C_1 と C_2 の比によって分流することから、以下の計算により求めることができる。

$$I_{g2} = \frac{\frac{1}{3\omega C_1}}{\frac{1}{3\omega C_1} + \frac{1}{3\omega C_2}} I_g \cdots \text{④}$$

④式の分母・分子に $3\omega C_1 C_2$ を掛けると、以下の式に変形できる。

$$I_{g2} = \frac{C_2}{C_1 + C_2} I_g$$

I_g に(a)で求めた答えを代入すると、

$$\begin{aligned} I_{g2} &= \frac{C_2}{C_1 + C_2} \cdot 2\sqrt{3}V\pi f(C_1 + C_2) \\ &= 2\sqrt{3}V\pi f C_2 \cdots \text{⑤} \end{aligned}$$

⑤式に各数値を代入して I_{g2} を計算する。

$$\begin{aligned} I_{g2} &= 2\sqrt{3}V\pi f C_2 \\ &= 2\sqrt{3} \times 6600 \times \pi \times 60 \times 0.02 \times 10^{-6} \\ &\approx 0.08619 \rightarrow 86[\text{mA}] \text{ (答)} \end{aligned}$$

ただし、 I_{g1} は配電線全対地静電容量に流れる電流を示す。

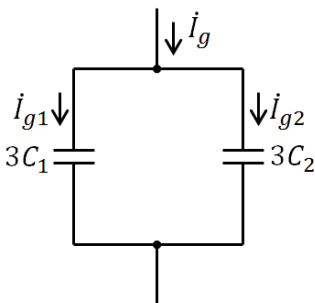


図5 分流

(別解)

図3の等価回路より、それぞれの静電容量(C_1 及び C_2)には同じ電圧(対地電圧 $V/\sqrt{3}$)が加わっていることから、 I_{g2} はオームの法則より次式で示すことができる。

$$\begin{aligned} I_{g2} &= \frac{V/\sqrt{3}}{\frac{1}{3\omega C_2}} = \frac{V \cdot 2\pi f \cdot 3C_2}{\sqrt{3}} \\ &= 2\sqrt{3}V\pi f C_2 [\text{A}] \end{aligned}$$

となり、⑤式と一致する。

本問のように、完全地絡(地絡抵抗が 0Ω)であれば、需要設備側に分流する電流は本式により需要設備側の対地静電容量だけで求めることができる。

【補足】

◆不必要動作(もらい動作)について

本問は、需要設備に設置されている地絡継電器の保護範囲外の事故(構外事故)に対する

不必要動作に関する問題である。

地絡事故の際に流れる地絡電流は、地絡事故点から配電用変電所の同一バンク内の他の配電線や他の需要家に向かい、それぞれの対地静電容量を通して流れ込むことから、当該配電線以外の零相変流器も同様に地絡電流を検出している。

従って、需要設備側の対地静電容量が大きい場合(構内ケーブルが長い場合)で地絡継電器(以下、GR)を設置している場合は、需要設備側のGRが不必要動作を起こす可能性がある。その対策としては、GRに替えて地絡方向継電器(以下、DGR)を設置する方法がある。

解答(b)で使った⑤式を用いて、GRの一般的な整定値(電流)である200mAを上限とした場合、需要設備一相あたりの全対地静電容量の値を計算すると、周波数60Hzでは $0.047\mu\text{F}$ 、50Hzでは $0.056\mu\text{F}$ となる。

故に、構内ケーブルの静電容量がこれらの数値以上となる場合は、需要設備構外の事故に対して、GRの不必要動作を起こすことになる。

◆DGRについて

地絡事故が発生すると、対地電圧を起電力として事故点から大地へ地絡電流が流れることになるが、GRが地絡電流(零相電流 I_0)の大きさのみを検出して動作するのに対してDGRは、零相変流器(ZCT)が検出する地絡電流(零相電流 I_0)の流れる方向と地絡事故時に発生する零相電圧 V_0 (中性点と大地との間の電位差)との位相差を比較することにより、構内事故か構外事故かを判別して動作する。

具体的には図6のように、構内事故と構外事故では零相変流器で検出される電流の方向が180度異なることから、DGRへの入力電流方向が、基準入力となる零相電圧と同じ動作領域にある場合を構内事故と判定し動作する。非接地系統に流れる地絡電流は、主に対地静電容量に

流れる電流のため零相電圧より90度進みの電流となるが、実際には、制限抵抗等流れる有効分電流があるため、90度よりは遅れの電流となる。

地絡事故が発生した場合は、零相電圧及び地絡電流の大きさが整定値を超え、かつDGR入力電流の位相が動作領域にある状態で整定時限を越えた時点で、遮断器にトリップ信号が送られて遮断するシステムとなっている。

なお、零相電圧を検出する装置としては、配電用変電所では接地形計器用変圧器：EVT（旧GPT）、需要設備では零相計器用変圧器：ZVT（旧ZPD）となる。

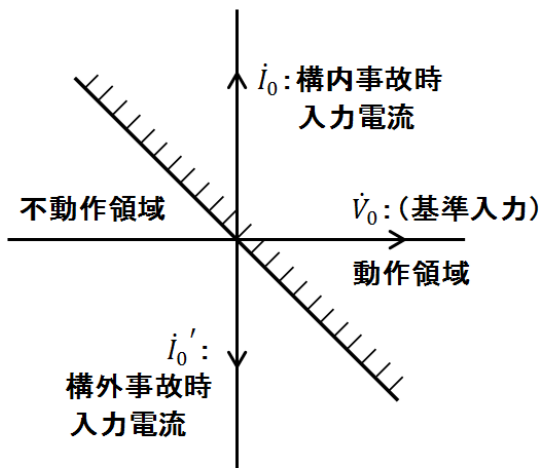


図6 DGR入力ベクトル図

◆コンデンサの合成静電容量について

本問においてテブナンの定理の適用にあたり内部インピーダンス Z_0 (R_g を除く)を求めた際、図3のとおり高圧配電線路並びに需要設備の全対地静電容量を各相の並列接続として一つのコンデンサとして扱うことができ、その場合の合成静電容量は次のとおり説明できる。

図7のように、 C_1 、 C_2 、 C_3 の3つのコンデンサを並列に接続し、各コンデンサの両端の電位差を V とすると、静電容量 C は「単位電位差あたりの貯蔵電荷」であるとの定義より、各コンデンサには次式のとおり電荷 Q が蓄えられる。

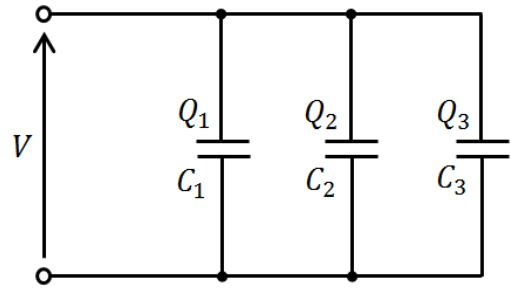


図7 並列接続

$$C = \frac{Q}{V} \text{ より、} Q = CV \text{ (柿はシブイ)}$$

$$Q_1 = C_1V, Q_2 = C_2V, Q_3 = C_3V$$

回路全体に蓄えられる電荷は、電荷の保存性から、各コンデンサに蓄えられた電荷の和となり、

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 = V(C_1 + C_2 + C_3)$$

よって、合成静電容量を C_0 とすると、

$$C_0 = \frac{Q}{V} = C_1 + C_2 + C_3$$

以上の結果から、並列接続の場合の合成静電容量は各静電容量の和となる。本問では各コンデンサの静電容量が同じであることから、合成静電容量は一相の対地静電容量の3倍となる。

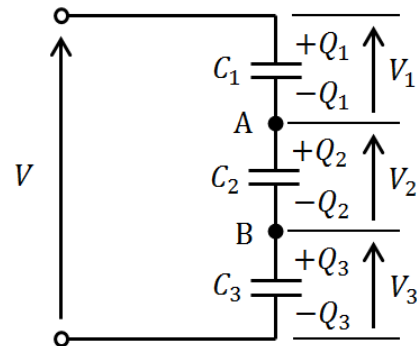


図8 直列接続

次に直列接続の取扱いを述べる。図8のように、各コンデンサを連続して接続する方式を直列接続という。ここで、コンデンサ C_1 の下部極板に $-Q_1[C]$ の電荷があり、コンデンサ C_2 の上部極板には $+Q_2[C]$ の電荷があるとすると、図のA点では電荷の保存性から、以下が成り立つ。

$$-Q_1 + Q_2 = 0 \text{ ゆえに } Q_1 = Q_2$$

これはB点でも同様であり、

$$Q_1 = Q_2 = Q_3 = Q$$

となることから、直列接続された各コンデンサ

の電荷の大きさは同じといえる。

各コンデンサに加わる電圧は $Q = CV$ より、次式で示される。

$$V_1 = \frac{Q}{C_1} \quad V_2 = \frac{Q}{C_2} \quad V_3 = \frac{Q}{C_3}$$

また、全電位差 V と各コンデンサの電位差との関係は、キルヒホッフの電圧則より、

$$V = V_1 + V_2 + V_3 = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2} + \frac{Q}{C_3}$$

$$= Q\left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}\right)$$

従って、合成静電容量を C_0 とすると、

$$\frac{1}{C_0} = \frac{V}{Q} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}$$

以上の結果から、直列接続の場合の合成静電容量の逆数は、各静電容量の逆数の和となる。

直列接続は、各コンデンサに加わる電圧を低く抑える（分圧）ことで、回路全体の耐電圧を上げることが目的として採用することがあるが、その考えを示した問題が2016年度理論科目の問題7に出題されているので、参考にされたい。

本連載第1回の「静電気」（4月6日付掲載）で述べたように、単に公式を暗記するのではなく、静電容量の背景にある『電荷→電気力線→電界→電位→静電容量』の流れが大切であり、本問のような回路計算にもこういった考えが本質として欠かせないこととなる。

なお、リード線の物理的な意味は、各素子をつなぐ導線という意味と、『リード線がつながっている点は同電位である』という回路理論において重要なことの二つの意味がある。

◆静電容量との容量リアクタンスの関係

直流回路における抵抗は、電流を妨げる作用を行うが、交流回路では抵抗の他にコイルとコンデンサも同様の作用を行う。それぞれの作用の大きさを示す量として、誘導リアクタンス X_L と容量リアクタンス X_C がある。

静電容量との容量リアクタンスの関係は、以下のとおり説明できる。

図9の回路において、静電容量 C のコンデンサに加わる交流電圧を $v = \sqrt{2}V \sin \omega t$ とすると、このときコンデンサに流れる電流 i （瞬時値）は、電流の定義「単位時間あたりに移動する電荷量」及び $Q = CV$ より、次式で示される。

$$i = \frac{dq}{dt} = \frac{d}{dt} Cv$$

$$= C \frac{d}{dt} \sqrt{2}V \sin \omega t = \omega C \cdot \sqrt{2}V \cos \omega t$$

$$= \frac{\sqrt{2}V}{\frac{1}{\omega C}} \sin(\omega t + \frac{\pi}{2})$$

以上から実効値を示すと、

$$I = \frac{V}{\frac{1}{\omega C}} = \frac{V}{X_C}$$

となり、ここから容量リアクタンスは、

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C} [\Omega]$$

となり、単位は抵抗と同じく $[\Omega]$ で表される。

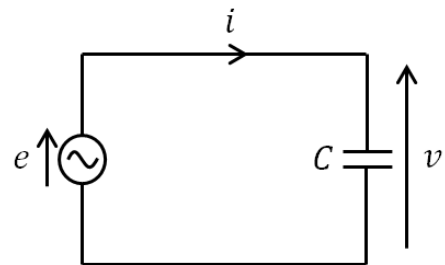


図9

<ポイント>

- 本問で求めた需要設備側の零相変流器で検出される電流 I_{g2} は、需要設備のケーブルの静電容量に電荷を蓄えるための充電電流（大きさは印加電圧による）に他ならない。本連載の「絶縁耐力試験」（9月21日付掲載）の問題のように、試験電圧を印加した場合の充電電流の計算と、本問の需要設備の零相検流器で検出される電流計算は同じ式で示され、出題内容は違うもののテーマは

同じ「対地静電容量に流れる電流（充電電流）」の計算となっている。

- 一線地絡電流が送配電系統に流れると、遮断器が動作するまでの間、通信線との相互インダクタンスによる電磁誘導電圧（障害）が発生する。電磁誘導電圧は一線地絡電流の大きさに比例するが、一線地絡電流の大きさは中性点接地方式の種類により変わる。

非接地方式は、一線地絡電流が十数アンペア程度であることから、電磁誘導障害の影響は少ないが、超高圧系統で採用されている直接接地方式では、短絡電流に近い電流のため影響が大きいことから、事故系統の高速遮断などの対策をとっている。

なお、一線地絡電流計算については2016年度電力科目の問16に、電磁誘導障害については、同年度電力科目問8に出題されており、『**地絡事故→中性点接地方式→電磁誘導障害**』は、一連のテーマとして学ぶ必要がある。

- 本問は、高圧需要家用地絡保護装置の不必要動作（もらい動作）に関する内容であり、需要設備の問題（施設管理）となることから法規からの出題となっているが、本問の解答にあたり必要な知識としては、電力科目の地絡故障計算の考え方に加え、中性点接地方式の特徴、理論科目の静電容量の並列接続やテブナンの定理など電気理論や回路計算の理解が重要となる。
- 一見とっつきにくい問題でも、電力系統は、抵抗、リアクトル、コンデンサの各素子が直並列に組み合わさって構成された回路であり、各素子ではオームの法則が成り立ち、回路内の電流や電圧はキルヒホッフの法則やテブナンの定理など回路計算の基本法則が必ず成り立つことを前提に、解答のような等価回路を描くことが回路計算の肝とな

る。つまり電流の経路がどうなるか、当該地点の電位はどうなるかを考えることが回路計算のテーマとなる。

- これらは三種で学んだ理論が基礎となっており、電験の試験科目は4科目で構成されているが、電力設備に関わる様々な事象は“科目”で区別できないことから、各項目を体系的（いもづる式）に学ぶことが実務にとっても大切なことである。

以上