

【問題】

変電所から三相3線式1回線の専用配電線で受電している需要家がある。この配電線路の電線1条あたりの抵抗及びリアクタンスの値は、それぞれ 3Ω 及び 5Ω である。この需要家の使用電力が 8000kW 、負荷の力率が 0.8 （遅れ）であるとき、次の(a)、(b)及び(c)に答えよ。

- (a) 需要家の受電電圧が 20kV のとき、変電所引出口の電圧の値[kV]はいくらか。
- (b) 需要家にコンデンサを設置して、負荷の力率を 0.95 （遅れ）に改善したときの配電線の電圧降下の値[V]の、コンデンサ設置前の電圧降下の値[V]に対する比率[%]はいくらか。ただし、この需要家の受電電圧[kV]は、コンデンサ設置前と同一の 20kV とする。
- (c) 力率改善のために設置したコンデンサの容量[kvar]はいくらか。

（出典：2003年度第3種電気主任技術者試験 法規問12改題）

解答の解説に先立ち、本題における”学習のねらい”について以下に述べる。各問に見通しをつけて解答に臨んでいただきたい。

- ① 1相分の等価回路を描き、等価回路からキルヒホッフの電圧則（電圧平衡式）を立式できるか。また、電圧則の式から1相分のベクトル図を描き、電圧降下を表す式を立式できるか。このとき、相電圧と線間電圧の違いを理解しているか。
- ② 力率改善後の線路電流を求めることができるか。また、電流の有効分及び無効分を求め、ベクトル図上で表現できるか。
- ③ 各電力ベクトルと力率の関係を理解しているか。また、無効電力の遅れ進みを理解しているか。

【解答】

(a) 変電所引出口の電圧を求めるためには、当該配電線の受電端における電圧降下を求めることが必要となる。計算の手順としては、本紙6月21日掲載の「送電線の電気的特性」で述べたように、1相分の等価回路（図1）から電圧則を立式し、その式からベクトル図（図2）を描くという、交流回路計算の基本となる手順で進める。なお、問題文には電圧降下の求め方について特

段の指示がないが、電験3種では簡易式を用いることが多く、本題でも計算を簡単にするため簡易式を用いる。

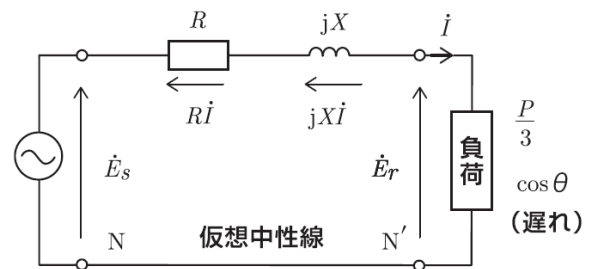


図1 等価回路（1相分）

ただし、

E_s [V]：送電端（変電所引出口）相電圧

E_r [V]：受電端相電圧

I [A]：線路電流

P [W]：受電電力

R [Ω]：線路全抵抗

X [Ω]：線路全リアクタンス

Z [Ω]：線路合成インピーダンス

図1の等価回路より電圧則を立式する。

$$\dot{E}_s = \dot{E}_r + Ri + jXi \text{ [V]} \cdots \textcircled{1}$$

- ①式より、図2のベクトル図を作図する。なお、基準ベクトルを \dot{E}_r 、力率 $\cos\theta$ は遅れとする。

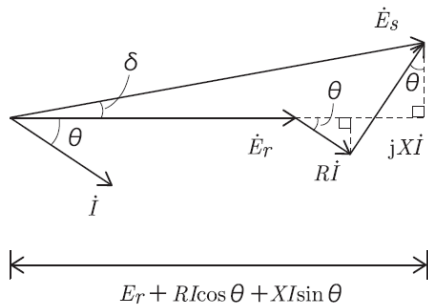


図2 ベクトル図 (1相分)

一般的に配電線においては、変電所引出口電圧と受電端電圧との相差角 δ が十分小さいため、変電所引出口電圧は以下の式で近似できる。

$$E_s \approx E_r + RI \cos \theta + XI \sin \theta$$

$$E_s \approx E_r + I(R \cos \theta + X \sin \theta) \cdots \textcircled{2}$$

②式を線間電圧で表すと以下の式となる。

$$\sqrt{3}E_s \approx \sqrt{3}\{E_r + I(R \cos \theta + X \sin \theta)\}$$

$$\therefore V_s \approx V_r + \sqrt{3}I(R \cos \theta + X \sin \theta) \cdots \textcircled{3}$$

ただし、

V_s [V] : 送電端 (変電所引出口) 線間電圧
 V_r [V] : 受電端線間電圧

線路電流 I の大きさは、受電電力 P から以下のとおり求めることができる。

$$I = \frac{P}{3 E_r \cos \theta} = \frac{P}{\sqrt{3} V_r \cos \theta}$$

$$= \frac{8000 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 20 \times 10^3 \times 0.8} = \frac{500}{\sqrt{3}} \approx 288.7 \text{ A}$$

③式に数値を代入して変電所引出口線間電圧を求める。

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

$$= 20 \times 10^3 + \sqrt{3} \times \frac{500}{\sqrt{3}}$$

$$\times (3 \times 0.8 + 5 \times \sqrt{1 - 0.8^2})$$

$$= 22700 = 22.7 \text{ kV (答)}$$

(b) 負荷の力率を 0.95 (遅れ) に改善したときの電流 I' を (a) と同様に求める。なお、題意より、受電電圧はコンデンサ設置前と同一の

20kV、改善後の力率を $\cos \theta'$ とする。

$$I' = \frac{P}{\sqrt{3} V_r \cos \theta'} = \frac{8000 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 20 \times 10^3 \times 0.95}$$

$$\approx \frac{421.053}{\sqrt{3}} \approx 243.1 \text{ A}$$

題意より、コンデンサ設置前後の電圧降下の比率は以下のとおり表せる。

$$\text{比率} = \frac{\text{コンデンサ設置後の電圧降下 } v'}{\text{コンデンサ設置前の電圧降下 } v} \times 100 [\%] \cdots \textcircled{4}$$

また、電圧降下 v は、③式を変形した以下の簡易式で求めることができる。

$$v = V_s - V_r \approx \sqrt{3}I(R \cos \theta + X \sin \theta) \cdots \textcircled{5}$$

④式及び⑤式に数値を代入して比率を求める。

$$\text{比率} = \frac{\sqrt{3}I'(R \cos \theta' + X \sin \theta')}{\sqrt{3}I(R \cos \theta + X \sin \theta)} \times 100$$

$$= \frac{\sqrt{3} \times 243.1 \times (3 \times 0.95 + 5 \times \sqrt{1 - 0.95^2})}{\sqrt{3} \times 288.7 \times (3 \times 0.8 + 5 \times \sqrt{1 - 0.8^2})} \times 100$$

$$\approx 68.78 \approx 68.8 \% \text{ (答)}$$

一般に配電線では、配電用変電所の負荷時タップ切換変圧器 (LRT) による送り出し電圧 (引出口電圧) の調整、柱上変圧器のタップ調整及び自動電圧調整器 (SVR) などにより、受電電圧を法令の範囲内に維持している。引出口電圧は、重負荷時は高く、軽負荷時に低くなるよう線路電圧降下補償器 (LDC) で自動的に LRT のタップを制御していることから、常に一定とは限らない。本題では、力率改善により負荷電流が減少することで引出口電圧が変化することや計算を簡単にする事等により受電電圧を力率改善の前後で同一としている。

また、電圧降下は送電端電圧と受電端電圧の大きさ (絶対値) の差であり、図 3 のベクトル図上の $\sqrt{3}Zi$ の大きさの差ではないので、 $\sqrt{3}Zi$ を用いると誤った解答となってしまう。

$$\left[\begin{array}{l} \text{本来の電圧降下 } v = |\dot{V}_s| - |\dot{V}_r| \\ \text{誤った電圧降下 } v = \dot{V}_s - \dot{V}_r = \sqrt{3}Zi \end{array} \right]$$

$$\dot{V}_s = \dot{V}_r + \sqrt{3}i(R + jX) = \dot{V}_r + \sqrt{3}Zi \text{ (精密式)}$$

なお、 $i = I(\cos \theta - j \sin \theta)$ なので、

$$\begin{aligned} \dot{Z}i &= (3 + j5) \times \{288.7 \times (0.8 - j\sqrt{1 - 0.8^2})\} \\ &\approx 1559 + j635V \\ \dot{Z}i' &= (3 + j5) \times \{243.1 \times (0.95 - j\sqrt{1 - 0.95^2})\} \\ &\approx 1070 + j929V \\ \frac{\sqrt{3}|\dot{Z}i'|}{\sqrt{3}|\dot{Z}i|} &= \frac{|1070 + j929|}{|1559 + j635|} \approx \frac{1417}{1683} \\ &\approx 0.842 \end{aligned}$$

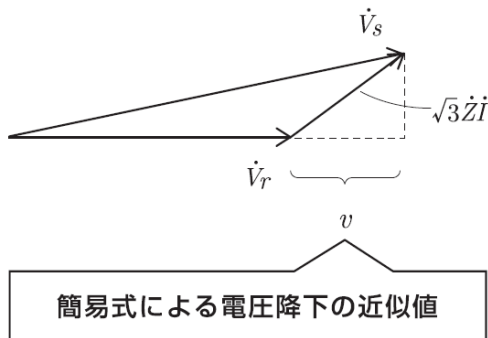


図3 電圧降下の定義

ここで、電流を複素数表示して、有効分と無効分の具体的な大きさを確認してみる。

コンデンサ設置前

$$\begin{aligned} \dot{I} &= I(\cos \theta - j \sin \theta) \\ &= 288.7(0.8 - j\sqrt{1 - 0.8^2}) \\ &= 231.0 - j173.2 \text{ A} \end{aligned}$$

コンデンサ設置後

$$\begin{aligned} \dot{i}' &= I'(\cos \theta' - j \sin \theta') \\ &= 243.1(0.95 - j\sqrt{1 - 0.95^2}) \\ &= 230.9 - j75.91 \text{ A} \end{aligned}$$

$$\left(\because I \cos \theta = \frac{P \text{ (一定)}}{\sqrt{3}V_r \text{ (一定)}} \approx 231 \text{ A} : \text{一定} \right)$$

題意より、コンデンサ設置前後で負荷の受電電力及び受電電圧が変わらないため、有効分電流は変わらないが、無効分電流が大きく減少（約6割減）していることがわかる。

図4の電流ベクトルで、受電電圧とコンデンサ設置前後の電流の関係を確認する。力率改善により受電電圧に対する電流の位相と大きさが変化するが、上記の計算結果のとおり、電流ベクトルは有効電力及び受電電圧が一定の場合、電

流の有効分 ($I \cos \theta$) が一定となり、無効分のみが変化している点に注目してほしい。

コンデンサ設置後の等価回路は図5となり、線路電流 i' は、図6で示すように負荷電流 i_L とコンデンサ電流 i_C の合成電流 ($i' = i_L + i_C$) となる。コンデンサ電流 i_C は進み無効電流であり、負荷電流の無効分 ($I \sin \theta$) を相殺するよう働くことから、図4で示すようにコンデンサ設置後の無効分が $I' \sin \theta'$ に減少する。

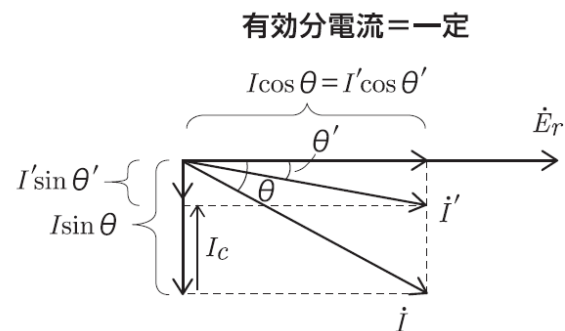


図4 電流ベクトル図

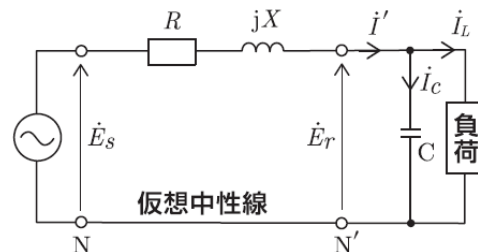


図5 コンデンサ設置後の等価回路（1相分）

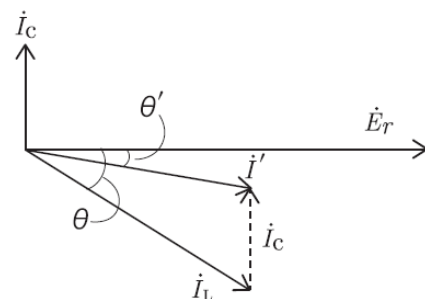


図6 コンデンサ設置後のベクトル図

力率 $\cos\theta$ が大きくなるほど電流ベクトルの向きは電圧ベクトルの向きに近づくことから、力率は電圧と電流の親密度（位相が近づく＝波長が合う）を表しているとも言える。

(c) 力率改善のために設置するコンデンサは、前述した (b) の電流のように、遅れ無効電力（電流）を補償することが目的の設備である。コンデンサの容量を求める場合は、コンデンサ設置前後で無効電力がどのように変化するかを考える必要があるため、図4の電流ベクトルと同様に図7の電力ベクトルで考えるとわかりやすい。電力ベクトルより、コンデンサ設置前の無効電力 Q を受電電力 P で表す。

$$\frac{Q}{P} = \tan\theta$$

$$\therefore Q = P \tan\theta = P \frac{\sin\theta}{\cos\theta}$$

同様にコンデンサ設置後の無効電力 Q' を受電電力 P で表す。

$$Q' = P \tan\theta' = P \frac{\sin\theta'}{\cos\theta'}$$

コンデンサ容量はコンデンサ設置前後の無効電力の差となるので、以下の式で求めることができる。

$$\begin{aligned} Q_c &= Q - Q' \\ &= P \frac{\sin\theta}{\cos\theta} - P \frac{\sin\theta'}{\cos\theta'} \\ &= P \left(\frac{\sin\theta}{\cos\theta} - \frac{\sin\theta'}{\cos\theta'} \right) \dots \text{⑥} \end{aligned}$$

⑥式に数値を代入してコンデンサ容量を求める。

$$\begin{aligned} Q_c &= 8000 \times 10^3 \times \left(\frac{\sqrt{1-0.8^2}}{0.8} - \frac{\sqrt{1-0.95^2}}{0.95} \right) \\ &\approx 3371 \times 10^3 \approx 3370 \text{ [kvar]} \text{ (答)} \end{aligned}$$

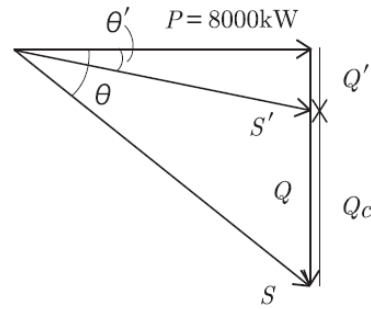


図7 電力ベクトル図

ただし、

S, S' [VA] : コンデンサ設置前後の皮相電力
 Q, Q' [var] : コンデンサ設置前後の無効電力
 Q_c [var] : コンデンサ容量

【補足】

◆力率と無効電力

力率は、皮相電力（設備容量）に対する有効電力（契約電力）の割合を示しており、力率がよくなるほど変圧器等の電源設備の利用率が高くなる。逆に力率が悪くなるほど有効電力に対する皮相電力が大きくなるが、図7の電力ベクトルより、皮相電力は無効電力が増加することで大きくなるのがわかる。つまり、力率を改善するには無効電力を制御すればよい。

※力率と各電力（有効電力 P 、無効電力 Q 、皮相電力 S ）の関係は、図7の電力ベクトルで考えるとわかりやすい。

$$\text{力率} \cos\theta = \frac{\text{有効電力} P}{\text{皮相電力} S} = \frac{P}{\sqrt{P^2+Q^2}} \dots \text{⑦}$$

$$P = S \cos\theta = \sqrt{3} V_r I \cos\theta$$

$$Q = S \sin\theta = \sqrt{3} V_r I \sin\theta$$

$$(\because S = 3 E_r I = \sqrt{3} V_r I)$$

なお、無効電力には遅れ無効電力と進み無効電力の2種類があり、一般的な負荷は、誘導電動機などの遅れ力率の負荷が多いことから、計算に際しては、遅れ無効電力を正（プラス）、

進み無効電力を負（マイナス）として取り扱うことが多い。

図7において、下向きの矢印で表記している無効電力（ Q 、 Q' ）は遅れ無効電力、上向きの矢印で表記している無効電力（ Q_C ）は進み無効電力を表している。なお、コンデンサは進み無効電力のみを消費（系統からみると遅れ無効電力を供給）する負荷である。

また、負荷の遅れ無効電力は受電端電圧を下げる効果があり、進み無効電力は受電端電圧を上げる効果がある。

◆力率に関する基準

力率がよいとは、力率が大きい（1に近づく）ことを意味しており、電力損失の軽減、適正電圧の維持など電力系統の安定供給に大きな影響を及ぼすことから、以下のような基準を設け、それぞれの当事者が管理することとなっている。

（1）「電気供給約款」では、負荷の力率をよくすることで電力損失を低減し、設備の利用率を高めることが効率的であることから、需要家の力率が85%を上回る場合に基本料金を割引く力率割引制度があり、各需要家が進相用のコンデンサを設置している。

（2）「系統連系規程」では、（1）の約款に準じて、発電設備設置者は受電点の力率を85%以上とし、かつ系統側からみて進み力率とならないようにすることが規定されている。

（3）「エネルギーの使用の合理化等に関する法律」（省エネ法）では、経済産業大臣は、エネルギーを使用して事業を行う者の判断の基準となるべき事項を定め、公表することとなっている。

「工場等におけるエネルギーの使用の合理化に関する事業者の判断の基準」（告示）において、受電端における力率を95%以上となるように管理することが規定されている。

◆力率改善の効果

力率改善の効果は、電力供給者側及び需要家側を含め、以下の4点となる。

（1）定格電圧の維持

需要家側での定格電圧の維持は、電気機器の適正使用に必須であり、電気事業法施行規則において具体的な値が規定されている。コンデンサを設置することで、線路電流の位相と大きさが変化するため、電圧降下が低減し電圧変動が抑制される。

（2）電力損失の低減

本題は力率改善による線路の電圧降下の減少に関する問題であるが、力率改善により電線路の電力損失も減少する。その比率は、

$$\frac{\text{コンデンサ設置後の電力損失}}{\text{コンデンサ設置前の電力損失}} = \frac{3RI'^2}{3RI^2}$$

$$= \left(\frac{I'}{I}\right)^2 = \left(\frac{\frac{P}{\sqrt{3}V_r \cos \theta'}}{\frac{P}{\sqrt{3}V_r \cos \theta}}\right)^2 = \left(\frac{\cos \theta}{\cos \theta'}\right)^2$$

$$= \left(\frac{0.8}{0.95}\right)^2 = (0.842)^2 \approx 0.71$$

となり、電力損失は力率の2乗に反比例し、負荷の力率を改善することは送配電線の電力損失の軽減に大きな効果があることがわかる。なお、電流 $I \propto$ 皮相電力 S なので、電力損失は皮相電力の2乗に比例する。

（3）電気料金の低減

前項の力率に関する基準で説明したとおり、各電力会社における力率割引により、85%を上回る場合に基本料金が割り引きされる。

（4）設備容量の低減

電流の位相変化に伴い大きさが減少することにより皮相電力が低減するため、変圧器等電源設備の容量低減が図れる。また、設備容量に余力ができるため同一の変圧器容量で負荷の増設に対応可能となる。

<ポイント>

- 電力の安定供給のためには、電力損失の軽減、適正電圧の維持が重要であり、負荷の力率改善 ($\cos\theta = 1.0$ に近づける) は、電力系統全体に影響する大事なファクターである。電力ベクトルにおける有効電力、無効電力及び皮相電力と力率の関係を説明できるよう、1相分の電圧・電流ベクトル(図2)を含め、繰り返し復習してほしい。
- 法規における施設管理は、電磁気(静電容量)、交流回路計算、送配電線の電気的特性など、理論科目や電力科目の応用問題となっている。一見、実務的な問題や難易度が高いと思われる問題でも、ベースとなる考えは電磁気の基礎及び回路計算の基礎である。本年の試験まで残すところわずかとなったが、基本的な問題を確実に理解すること、問題演習でつまづいた場合は、ベースとなる考えに立ち戻って暗記ではなく本質的な理解を深めることに注力し、体調管理に留意して試験に備えていただきたい。

(T. W.)