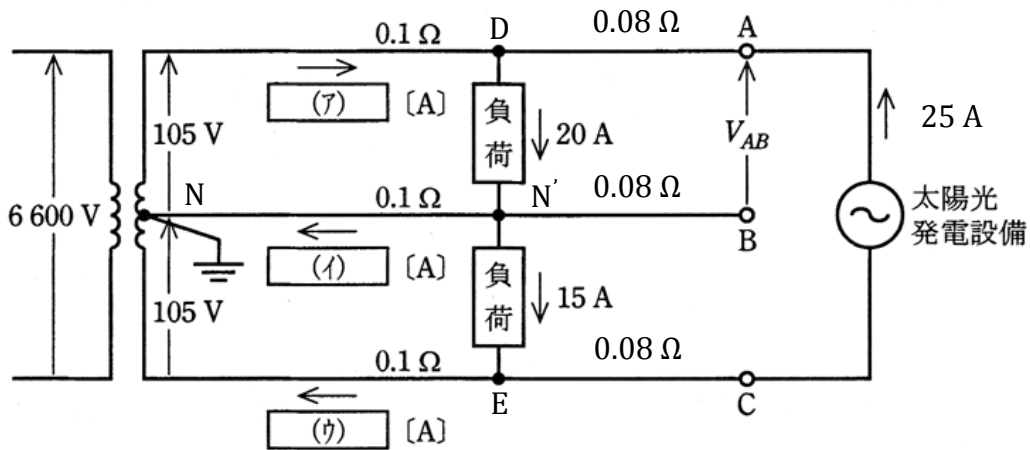


【問題】

図のような単相3線式配電線路がある。系統の途中に図のとおり負荷が接続されており、末端のAC間に太陽光発電設備を逆変換装置を介して接続する計画がある。各部の電圧及び電流が図に示された値であるとき、次の(a)、(b)及び(c)の問に答えよ。ただし、図示していないインピーダンスは無視するとともに、線路のインピーダンスは抵抗であり、負荷の力率は1、太陽光発電設備は発電出力電流（交流側）25 A、運転力率1で一定とする。



- (a) 太陽光発電設備を接続する前の図中 AB 間の端子電圧 V'_{AB} [V]はいくらか。
- (b) 太陽光発電設備を接続後に図中の回路の空白箇所(ア)、(イ)及び(ウ)に流れる電流 [A]はそれぞれいくらか。
- (c) 太陽光発電設備を接続後の図中 AB 間の端子電圧 V_{AB} [V]はいくらか。

(出典：2007年度第3種電気主任技術者試験 電力問17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 両外線に流れる電流と中性線に流れる電流には、キルヒホッフの電流則が成り立つこと。また、負荷の力率が100%の場合、回路全体の位相が電流・電圧ともにすべて揃うため、直流回路と同様に代数計算で取り扱えるが、力率が異なる場合は、複素数を用いた計算（記号法）が必要となること等を理解しているか。
- ② 上下の閉回路にはキルヒホッフの電圧則が成り立つことを理解しているか。
- ③ 太陽光発電設備からの発電出力電流（逆潮流）がある場合は電圧上昇が生じること、また、そ

の際の端子電圧が適正值（ $101 \pm 6V$ ）の範囲内に維持されるか否かについて、電圧の定義（電位差）を用いた計算を行って評価できるか。

【解答】

(a) 太陽光発電設備を接続する前の等価回路を図1に示す。変圧器二次側の電流分布を見ると、両外線には各負荷電流が流れ、節点N'にはキルヒホッフの電流則が成り立つことから、中性線に流れる電流 i_N は、 i_N の正方向を図1のように決めると、式①のとおり両外線の電流差（ベクトル差）として示される。

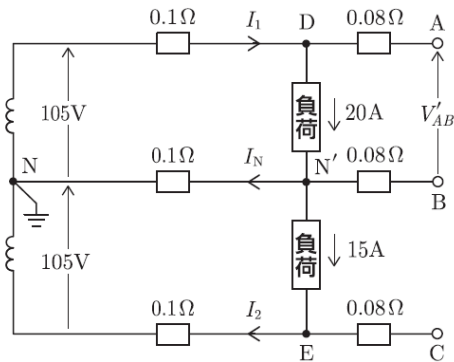


図1 太陽光発電設備を接続する前の等価回路

電流則の定義より、

流入する電流=流出する電流

であるから、節点 N' において以下が成り立つ。

$$I_1 = I_N + I_2$$

$$\therefore I_N = I_1 - I_2 [\text{A}] \cdots \textcircled{1}$$

題意より、負荷の力率は 1 となるので、中性線電流は大きさだけを考えればよく、①式に数値を代入して以下のとおり求めることができる。

$$I_N = 20 - 15 = 5 \text{ A}$$

I_N の計算結果が正（プラス）であることは、中性線電流は図 1 のとおり、負荷側から変圧器側に向かって流れることを示している。

次に各線を通る電流分布から各線路抵抗での電圧降下を考慮して、図 1 の等価回路からキルヒホッフの電圧則を立式することで端子電圧 V'_{AB} を求める。なお、太陽光発電設備が接続されていない段階では、問題図の AD 間、BN' 間、CE 間には電流が流れないことから電圧降下は生じないため、端子 A は節点 D と、端子 B は節点 N' と、端子 C は節点 E とそれぞれ同電位となり、上側の閉回路における負荷の端子電圧は AB 間の端子電圧 V'_{AB} と等しくなる。

<上側の閉回路>

$$105 = 0.1I_1 + V'_{AB} + 0.1I_N$$

$$105 = 0.1 \times 20 + V'_{AB} + 0.1 \times 5$$

$$105 = 2 + V'_{AB} + 0.5$$

$$\therefore V'_{AB} = 105 - 2.5 = 102.5 \text{ V (答)}$$

<参考：下側の閉回路>

参考までに、下側の閉回路についても、太陽光発電設備を接続する前の図中 BC 間の端子電圧 V'_{BC} を同様に求めてみる。

$$105 = -0.1I_N + V'_{BC} + 0.1I_2$$

$$105 = -(0.1 \times 5) + V'_{BC} + 0.1 \times 15$$

$$105 = -0.5 + V'_{BC} + 1.5$$

$$\therefore V'_{BC} = 105 - 1.0 = 104.0 \text{ V}$$

ここで、上側の閉回路の電圧則の式と下側の閉回路の電圧則の式を比べると、中性線の電圧降下が上側では加算され、下側では減算されていることがわかる。

負荷の不均衡度合いが大きいと中性線電流が大きくなり、その結果、中性線の電圧降下が大きくなることから端子電圧の不均衡度合いも大きくなるのが容易に想像できる。

(b) 太陽光発電設備の接続後における各線の電流値は、キルヒホッフの電流則より、以下の式で表される。ただし、上側の負荷電流を I_{L1} 、下側の負荷電流 I_{L2} 、発電出力電流を I_g 、両外線及び中性線の電流をそれぞれ I_7 、 I_1 、 I_2 とする。

<節点 D>

$$I_{L1} = I_g + I_7$$

$$\therefore I_7 = I_{L1} - I_g = 20 - 25$$

$$= -5 \text{ A (答)}$$

※答えの -5 A とは、実際の電流の向きが、計算の前提とした電流の向きとは逆向きであることを表している。よって、大きさは 5 A 、向きは節点 D から変圧器方向に流れる。

<節点 N'>

$$I_{L1} = I_{L2} + I_1$$

$$\therefore I_1 = I_{L1} - I_{L2} = 20 - 15$$

$$= 5 \text{ A (答)}$$

<節点 E>

$$I_{L2} = I_2 + I_g$$

$$\therefore I_2 = I_{L2} - I_g = 15 - 25$$

$$= -10 \text{ A (答)}$$

※大きさは 10 A、向きは変圧器から節点 E 方向に流れる。

(c) 小問 (a) では、図 1 の等価回路のとおり、上側と下側の二つの閉回路があることから、負荷の端子電圧をキルヒホッフの電圧則から求めることができた。本小問では AB 間が回路としてつながっていないため電圧則が使えないことから、電圧の定義 (回路の 2 点間の電位差) により求める必要がある。つまり、太陽光発電設備接続後の AB 間の端子電圧 V_{AB} は、端子 A の電位 V_A と端子 B の電位 V_B との電位差を表していることから、電位 V_A と電位 V_B を求めればよいことになる。

ここで、 V_{AB} の添え字である AB の意味合いは、単に AB 間の端子電圧というだけではなく、端子 B を基準にした端子 A との電位差という意味であり、電圧の矢印も端子 B から端子 A に向かう方向に描く。もし、端子電圧 V_{BA} と示された場合は、端子 A を基準にした端子 B との電位差という意味になり、電圧の矢印も端子 A から端子 B に向かう方向に描かなければならない。これは特に、三相交流回路を取り扱う場合において重要なことである。

本小問の等価回路を図 2 に示す。なお、電流の向きは、小問 (b) で求めた答えを反映している。

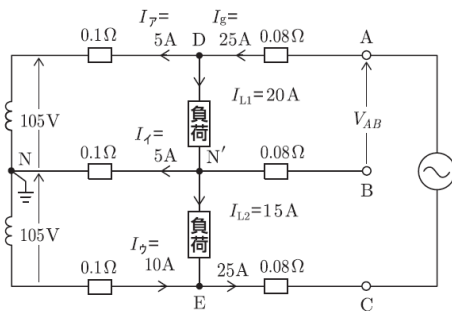


図 2 太陽光発電設備を接続後の等価回路

電位 V_A は問題図より、接地されている節点 N を零電位 (基準電位) として、 $N \rightarrow D \rightarrow A$ の順に起電力と逆起電力 (電圧降下) の向きに注意して足し合わせればよいため、以下の式で表される。

$$\begin{aligned} V_A &= 105 + 5 \times 0.1 + 25 \times 0.08 \\ &= 105 + 0.5 + 2 = 107.5 \text{ V} \end{aligned}$$

電位 V_B も同様に、 $N \rightarrow N' \rightarrow B$ の順に電圧降下を足し合わせ、以下の式で表される。

$$\begin{aligned} V_B &= 5 \times 0.1 + 0 \\ &= 0.5 + 0 = 0.5 \text{ V} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \therefore V_{AB} &= V_A - V_B = 107.5 - 0.5 \\ &= 107.0 \text{ V (答)} \end{aligned}$$

この計算結果から、当該発電設備は連系に必要な技術要件のうち、適正電圧 ($101 \pm 6 \text{ V}$) の維持の要件を満たしていることが確認できた。

【補足】

◆単相 3 線式の特徴

低圧配電線や屋内配線の電灯幹線においては、一般的に単相 3 線式 100/200 V 方式が採用されている。単相 3 線式は単相 2 線式と比べ以下の特徴がある。

(1) 平衡負荷の場合に電圧降下、電力損失が 1/4 に減少する。

(2) エアコン、電磁調理器 (IH)、レントゲンなど 200V を使用する電気製品が使用可能となる。

(3) 不平衡負荷の場合、端子電圧が不平衡となる。

(4) 負荷の不平衡度合いが大きい場合に中性線が断線 (欠相) すると、端子電圧の不平衡度合いが大きくなり、電気製品の定格電圧を超えて絶縁破壊を生じることがある。

単相 3 線式のデメリットである (3)、(4) の不平衡状態について、具体例と対策を以下で説明する。

なお、需要場所における電気工作物の工事、維持及び運用に関する民間規格となる「内線規程」では、不平衡状態について、「設備不平衡率」という指標で定義し、単相3線式電路ではやむを得ない場合に限り設備不平衡率を40%以内（三相3線式線路では、30%以内）と規定している。

<参考>

設備不平衡率[%] =

$$\frac{\text{中性線と各電圧側電線間に接続される負荷設備容量の差}}{\text{総負荷設備容量の } 1/2} \times 100$$

1. 力率が異なる負荷での中性線電流

<例題>

図のような単相3線式線路において、ab間及びbc間の負荷電流は、それぞれ10A（力率1.0）及び10A（力率遅れ0.88）である。この場合、中性線の電流の大きさ[A]と向きを求めよ。

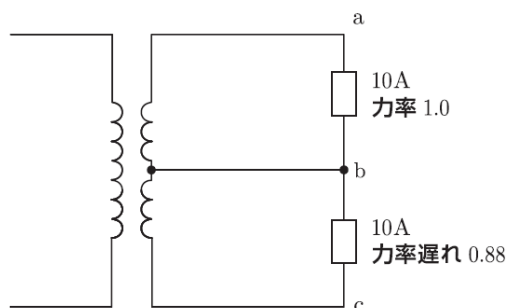


図3 例題図

【解答】

各負荷の力率が異なるため、代数計算ではなく記号法で求めることが必要となる。

図4のように、各負荷電流及び中性線電流の向きを仮定し、節点bにおいて電流則を適用すると、以下のとおり示される。

$$i_1 = i_N + i_2$$

$$\therefore i_N = i_1 - i_2$$

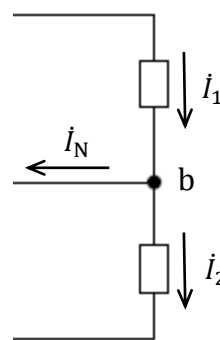


図4 電流分布

各負荷電流を複素数表示して計算する。位相の基準は端子電圧にとり、 $\cos\theta_1 = 1.0$ 、 $\cos\theta_2 = 0.88$ とおくと、

$$i_1 = I_1(\cos\theta_1 - j \sin\theta_1)$$

$$= 10(1.0 - j0) = 10 \text{ A}$$

$$i_2 = I_2(\cos\theta_2 - j \sin\theta_2)$$

$$= 10(0.88 - j\sqrt{1 - 0.88^2})$$

$$= 10(0.88 - j0.475)$$

$$= 8.8 - j4.75 \text{ A}$$

$$\therefore i_N = 10 - (8.8 - j4.75)$$

$$= 1.2 + j4.75 \text{ A}$$

$$\therefore I_N = \sqrt{1.2^2 + 4.75^2} \approx 4.90 \text{ A (答)}$$

各負荷電流の大きさが同じでも力率が少し異なるだけで本例題の場合、中性線には各負荷電流の約50%の大きさの電流が流れることがわかる。この時のベクトル図は図5のようになる。

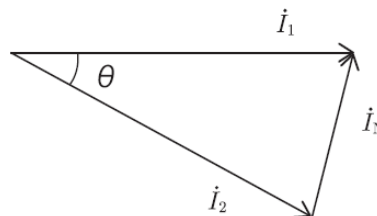


図5 ベクトル図

2. 中性線断線時の端子電圧

接続箇所の不具合や樹木倒壊などにより中性線が断線すると、負荷の不均衡度合に応じた電圧が負荷に印加される。具体的には、負荷インピーダンスにより電源側の電圧が分圧されることになるが、これを以下の例題で確認する。

<例題>

図の单相3線式線路において中性線が断線したとき、bc間の電圧 V_{bc} [V]はいくらか。ただし、線路インピーダンスは無視することとし、負荷インピーダンスは、加わる電圧に関係なく一定とする。

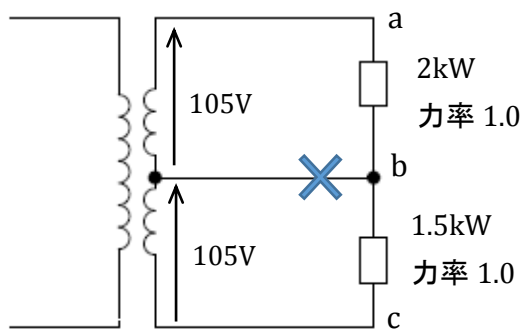


図6 例題図

負荷インピーダンス R を端子電圧 V と負荷電力 P で表すと、

$$P = V \cdot I$$

$$= V \times \frac{V}{R} = \frac{V^2}{R}$$

$$\therefore R = \frac{V^2}{P}$$

上式より、各負荷のインピーダンス R_{ab} 、 R_{bc} を求めると、

$$R_{ab} = \frac{105^2}{2 \times 10^3} \cong 5.51 \Omega$$

$$R_{bc} = \frac{105^2}{1.5 \times 10^3} = 7.35 \Omega$$

題意より、断線後の電圧 V_{bc} は、 R_{ab} と R_{bc} の直列接続に、線路インピーダンスを無視すると、電源電圧 E が加わる直列回路として扱え、各負

荷の端子電圧は分圧計算で求めることができる。

$$V_{bc} = E \times \frac{R_{bc}}{R_{ab} + R_{bc}}$$

$$= 210 \times \frac{7.35}{5.51 + 7.35} \cong 120V \text{ (答)}$$

計算の結果、 V_{bc} は 120V となり、軽負荷側の電圧が過大になること、定格電圧が 100V の電気製品の場合、定格電圧の 1.2 倍の電圧が加わることになり、絶縁破壊による故障のおそれがあることがわかる。このため、電気設備の技術基準の解釈第 35 条では、中性線へのヒューズ等の過電流遮断器の取り付けを禁止している。

3. 不平衡状態防止対策（バランスの働き）

单相3線式線路では、今まで述べたように、負荷の不均衡や中性線の断線により負荷端子電圧が不平衡となり、不平衡度合が大きいと定格電圧を超えるおそれがある。バランスは、常時に加え断線などの異常時も負荷端子電圧を平衡に保つことを目的として、線路末端に取りつける巻数比 1 の単巻変圧器の一種である。

図 6 (a) では、負荷の不均衡により中性線に 20A の電流が流れているが、図 6 (b) のようにバランスを接続すると、中性線側ではなくバランス側に電流が流れ、その大きさは、バランス接続前に中性線に流れる電流と等しい値となる。これは、バランスが巻数比 1 の単巻変圧器であることから、 $a'b'$ 間、 $b'c'$ 間の電圧が等しくなるようにバランスに流れるため、両外線の電流が平衡し中性線の電流が 0A になる。

なお、負荷の大きさが図 6 (a) とは逆に上側が 30A、下側が 50A の場合、中性線に流れる電流は変圧器から負荷側に流れる向きとなり、バランスには図 6 (b) とは逆に、 a' から b' に、 c' から b' に電流が流れることになる。

バランスに流れる電流、両外線及び中性線に流れる電流は、各節点において必ずキルヒホッフの電流則が成り立つように流れる。また、バ

ランサを含めた上下の閉回路には、それぞれキルヒホッフの電圧則が成り立つ。

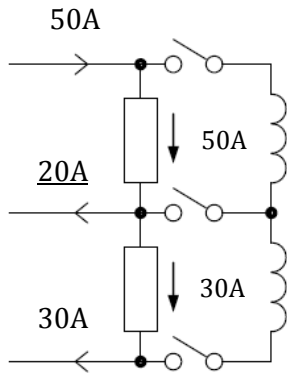


図 6 (a) バランサ接続前

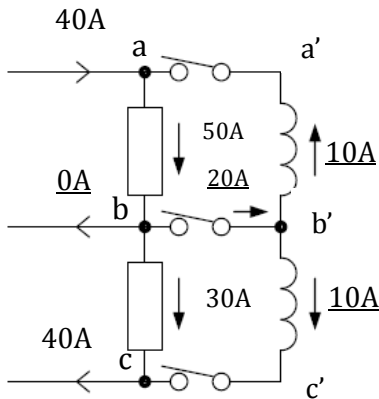


図 6 (b) バランサ接続後

◆系統連系の技術要件

太陽光・風力発電設備等の分散型電源を系統（正確には商用電力系統）に接続（連系）して運転する場合に、系統の電力品質を確保するための技術的要件をとりまとめた民間規格である「系統連系規程」では、力率、高調波、単独運転防止や事故時運転継続等の保護協調、電圧変動、短絡容量等を技術要件として規定している。

ここでは、本題に関係する力率と電圧変動について説明する。

1. 力率

前回の奮闘講座「送電線の電気的特性」で説明したとおり、受電端電圧は負荷力率（無効電力）の影響を受け、力率が遅れるほど電圧降下の度合いが大きくなり、力率が進むほど電圧上昇の度合いが大きくなることわかっている。一般的に負荷の力率は設備の利用率を高めることが効率的であることから、遅れ85%以上とすることが電気供給約款で規定されている。

「系統連系規程」では、この約款に準拠して受電点の力率（系統側からみて）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。

「系統側からみて力率が遅れ」の状態とは、構内に負荷と発電設備が設置されている需要家において、発電設備が出力する無効電力と負荷が消費する無効電力の合計が正（遅れ無効電力のこと）となった場合を表しており、一般的な遅れ力率の負荷がある場合と同じ状態と考えればよい。

2. 電圧変動

発電設備を低圧配電系統に連系する場合においても、発電設備設置者は電気事業法施行規則第 38 条に基づき、低圧需要家の電圧を標準電圧 100V に対しては $101 \pm 6V$ 、標準電圧 200V に対しては $202 \pm 20V$ 以内に維持する必要がある。本題のように、逆潮流による電圧上昇で適正値を逸脱するおそれがある場合は、発電設備側での対策が必要となる。

電圧逸脱の対策としては、パワーコンディショナ内に自動電圧調整装置等を設置し、進み無効電力の制御または発電出力の制御により電圧調整を行う。

<ポイント>

- 単相 3 線式線路における電圧・電流計算においては、回路計算の基本定理であるキルヒホッフの電流則及び電圧則で考えることが基本となる。その際、負荷の力率が異なる場合は、複素数によるベクトル計算が必要となる。上記はいずれも、理論で学習した直流回路計算ならびに交流回路計算の基礎であり、電験の応用問題を解くには基礎の理解・習熟が重要といえる。オームの法則やキルヒホッフの法則など、公式を覚えるのではなく、定義を理解して活用できる学習を進めてほしい。
- 再生可能エネルギーによる発電設備の系統連系は、太陽光発電設備を中心に広く普及しており、高圧配電系統への連系には電気主任技術者による保安管理が必要なことから、最近の電験 3 種においても太陽光発電システムの概要などが出題されている。逆潮流による電圧上昇対策、短絡容量の増大時の対策、保護協調の目的など、系統連系の基本を押さえてほしい。
- 本年度の電験 3 種試験日まで、本日を含まれてあと 46 日（うち、土日祝日は 14 日）と迫ってきた。用語の定義や定理の理解、基礎的な問題を中心に演習を重ねることが試験の際の応用問題に対応できる自信につながると考え、残り時間を有効に活用して悔いのない勉強をしてほしい。試験当日にそれまでの学習の成果が発揮できることを期待する。（T. W.）