

令和 2 年度

第 2 種

電力・管理

(第 1 時限目)

答案用紙記入上の重要事項及び注意事項

指示がありましたら答案用紙（記述用紙）4枚を引き抜いてください。答案用紙には、4枚とも直ちに試験地、受験番号及び生年月日を記入してください。

1. 重要事項

- a. 「選択した問の番号」欄には、必ず選択した問番号を記入してください。
記入した問番号で採点されます。問番号が未記入のものは、採点されません。
- b. 計算問題では、解に至る過程を簡潔に記入してください。
導出過程が不明瞭な答案は、0点となる場合があります。

2. 注意事項

- 記入には、濃度HBの鉛筆又はシャープペンシルを使用してください。
- 答案用紙は1問につき1枚としてください。
- 計算問題の答は、特に指定がない限り、有効数字は3桁です。なお、解答以外の数値の桁数は、誤差が出ないように多く取ってください。

例：線電流 I は

$$I = \frac{P}{\sqrt{3}V \cos \theta} = \frac{10 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 200 \times 0.9} = 32.075 \text{ A} \quad (\text{答}) 32.1 \text{ A}$$

1線当たりの損失 P_L は

$$P_L = I^2 R = 32.075^2 \times 0.2 = 205.76 \text{ W} \quad (\text{答}) 206 \text{ W}$$

- 記述問題については、問題の要求を逸脱しないでください。
例：「問題文に3つ答えよ。」という要求で、4つ以上答えてはいけません。
- 氏名は記載しないでください。（答案用紙に氏名記載欄はありません。）

答案用紙は、白紙解答であっても4枚すべて提出してください。
なお、この問題冊子についてはお持ち帰りください。

問 1～問 6 の中から任意の 4 問を解答すること。(配点は 1 問題当たり 30 点)

問 1 水車発電機の定格回転速度の選定の考え方に関して、次の問に答えよ。

周波数 60 Hz の系統の地点において、有効落差 162 m、出力 40 MW のフランス水車 1 台を設置する場合、最も適切な水車の定格回転速度 [min^{-1}] 及び発電機の極数を求めたい。

(1) フランス水車において、適用できる比速度と有効落差の関係が、次式によって表されるとき、次式に基づき算出される回転速度の上限値を求めよ。

$$n_s \leq \frac{23\,000}{H+30} + 40$$

ただし、 n_s : 比速度 ($\text{m} \cdot \text{kW}$ 基準)、 H : 有効落差 [m] とする。

なお、比速度 n_s は、出力 P [kW]、回転速度 N [min^{-1}] としたとき、

$$n_s = \frac{N \times P^{\frac{1}{2}}}{H^4} \text{ で与えられる。}$$

(2) 選定すべき定格回転速度を求めよ。また、その理由を 100 文字程度で述べよ。

(3) 小問(2)の場合の発電機の極数を導出せよ。

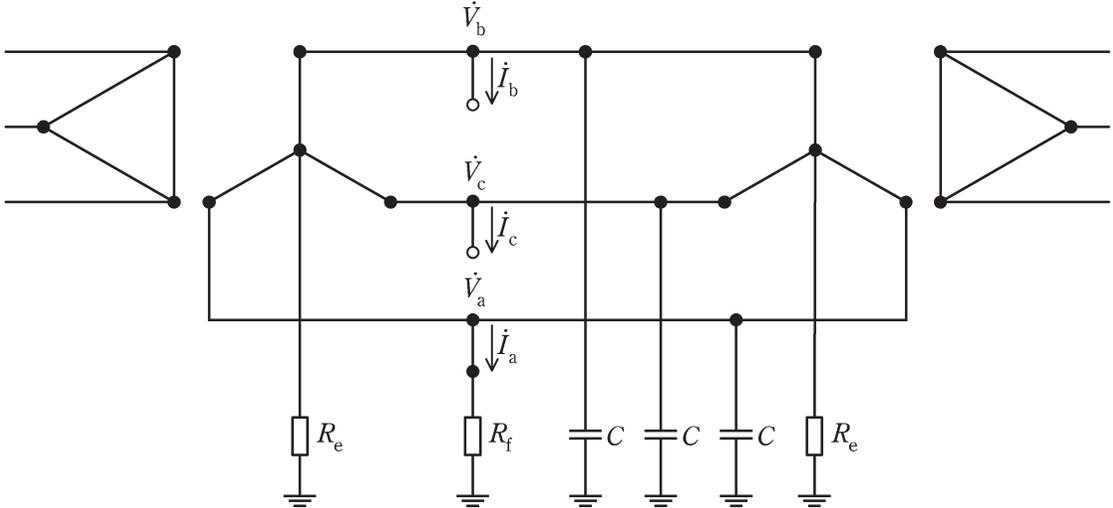
問2 保護リレーシステムは、電力系統の状態を把握する計器用変成器、そこから得られる情報をもとに事故を検出して事故除去指令を出す保護リレー、指令を受けて事故点を切り離す遮断器の、三つにより構成される。これらに関して、次の(1)～(3)のそれぞれに対し、100字程度で簡潔に述べよ。

- (1) 計器用変成器の役割について説明し、計器用変成器のうち最も代表的なものを二つ挙げよ。また、計器用変成器の比誤差 ϵ [%]を、公称変成比 K_n 、真の変成比 K を用いた式で表せ。
- (2) 保護リレーが電力系統を的確に保護するために具備すべき条件のうち、信頼性について説明せよ。
- (3) 一般に77又は66kV系統に使用される遮断器の定格遮断時間を、サイクル数で答えよ。また、遮断器において保護リレーからの事故除去指令を受ける箇所の名称を答え、あわせて同箇所が持つ引外し自由(トリップフリー)の機能と目的について説明せよ。

問3 対称座標法を用いた1線地絡故障の計算に関して、次の間に答えよ。

図のような送受電端の変圧器の中性点をそれぞれ R_e の抵抗で接地したこう長 20 km、電圧 66 kV、周波数 50 Hz の三相3線式1回線送電線路がある。

その a 相 1 線が R_f の抵抗を通じて地絡を生じた場合の地絡電流を求めたい。



- (1) 地絡電流 \dot{I}_g を、a 相の無負荷電圧 \dot{E}_a 、この送電回路の故障点から見た零相インピーダンス \dot{Z}_0 、正相インピーダンス \dot{Z}_1 、逆相インピーダンス \dot{Z}_2 、及び、地絡点の抵抗 R_f で表せ。

なお、故障点での各相電圧、各相電流を図に示すように \dot{V}_a 、 \dot{V}_b 、 \dot{V}_c 、 \dot{I}_a 、 \dot{I}_b 、 \dot{I}_c とし、それを対称成分に変換したものを \dot{V}_0 、 \dot{V}_1 、 \dot{V}_2 、 \dot{I}_0 、 \dot{I}_1 、 \dot{I}_2 としたとき、以下の関係となる。

$$\dot{V}_0 = -\dot{Z}_0 \dot{I}_0, \quad \dot{V}_1 = \dot{E}_a - \dot{Z}_1 \dot{I}_1, \quad \dot{V}_2 = -\dot{Z}_2 \dot{I}_2$$

また、故障条件から以下の関係となる。

$$\dot{I}_b = \dot{I}_c = 0, \quad \dot{V}_a = \dot{I}_a R_f$$

(2) 零相インピーダンス \dot{Z}_0 , 正相インピーダンス \dot{Z}_1 , 逆相インピーダンス \dot{Z}_2 をそれぞれ求めよ。ただし, 1 線当たりの対地静電容量 C は $0.005 \mu\text{F}/\text{km}$, 変圧器の中性点の抵抗 R_e は $\frac{2000}{3} \Omega$ として, その他のインピーダンス, また負荷電流は無視するものとする。

なお, $\pi = 3.1416$ とする。

(3) 小問(2)の条件に加えて, 地絡点の抵抗 R_f が 10Ω の場合における地絡電流の大きさ $|\dot{I}_g|$ [A] を求めよ。

問4 一般的に低圧配電方式として広く使用されている単相3線式について、次の問に答えよ。

- (1) 我が国の単相2線式(200Vと100V)と単相3線式を図で示し、単相3線式を用いた電力供給の特徴を、単相2線式と比較して利便性及び安全性の観点から200字程度で述べよ。ただし、小問(2)、(3)に関する特徴は除く。
- (2) 単相3線式は単相2線式と比較して電圧降下が小さいことを示したい。単相2線式と単相3線式とで100V負荷を用いる場合、単相2線式の負荷電力と単相3線式の負荷電力の合計が等しい際の100V負荷にかかる電圧降下について計算により比較せよ。ただし、単相3線式の各相間(電圧線と中性線との間)の負荷は等しいものとし、各方式での電線の太さは同一とし抵抗のみを考慮するものとする。
- (3) 単相3線式における中性線の欠相(断線)により発生する障害、欠相が生じる原因、及び障害の防止対策(防止対策については二つ)について述べよ。

問5 特別高圧架空電線路による電磁誘導障害について、次の問に答えよ。

- (1) 電磁誘導作用により通信線に誘起される電圧の種類を二つ挙げ、それぞれの発生原理について、簡潔に説明せよ。
- (2) 電磁誘導障害の防止対策のうち、架空電線路側の対策について、二つ答えよ。

問6 図1は、受変電設備の一部を表した単線結線図である。容量 $P_T = 12\,000\text{ kV}\cdot\text{A}$ の変圧器から、容量 $P_1 = 6\,000\text{ kW}$ で、力率 $\cos\theta_1 = 0.8$ (遅れ)の負荷に電力を供給しており、変圧器の2次側には、力率改善用コンデンサ $Q_1 = 2\,000\text{ kvar}$ が投入されている。この設備において、次の問に答えよ。なお、力率改善用コンデンサの直列リアクトルは考慮しなくてよい。

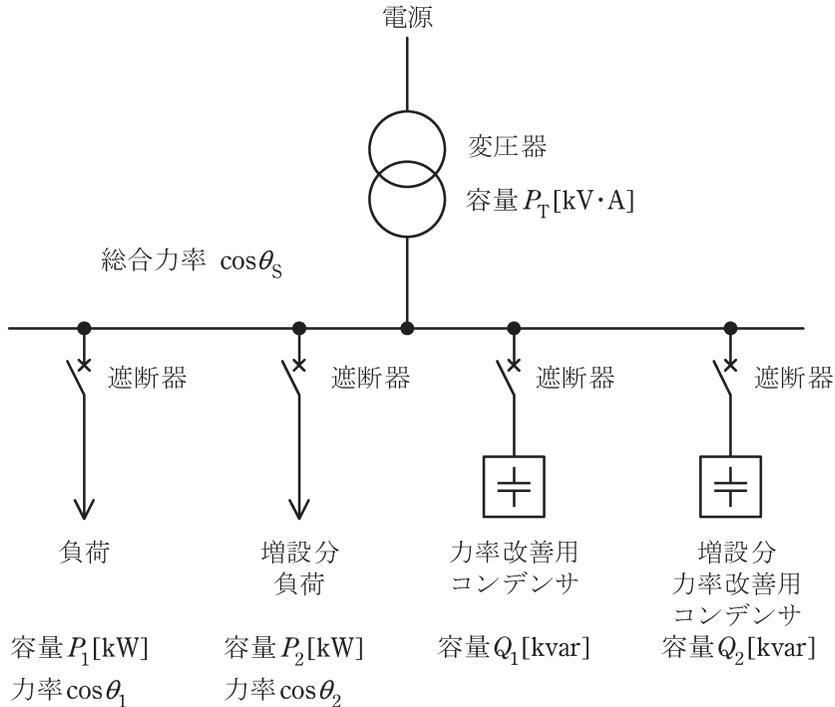


図1

- (1) 上記の運用状況をベクトル図に表すと、図2ようになる。この運用に、さらに容量 $P_2 = 4\,500\text{ kW}$ で、力率 $\cos\theta_2 = 0.6$ (遅れ)の負荷を増設すると、変圧器は過負荷になるおそれがある。そこで、変圧器を過負荷にしないためには、増設分の力率改善用コンデンサの容量 Q_2 [kvar]は、少なくともいくら必要か。また、このときの総合力率 $\cos\theta_s$ はいくらになるか。
- (2) 答案用紙に印刷されている図2に、 P_2 [kW]、 Q_2 [kvar]のベクトル図と、力率角 θ_2 を追記せよ。
- (3) 総合力率を $\cos\theta_s = 0.95$ (遅れ)にするためには、増設する力率改善用コンデンサの容量 Q_2 [kvar]はいくら必要か。

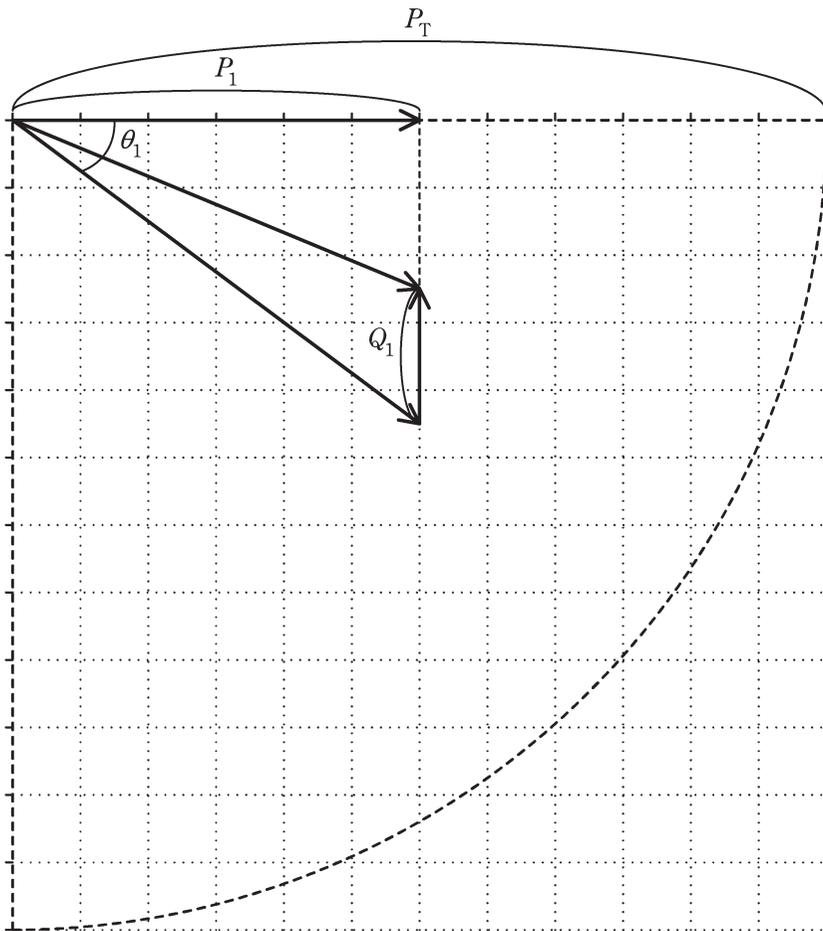


图 2

配点：一題当たり 30 点

電力・管理科目 4 題×30 点＝120 点

機械・制御科目 2 題×30 点＝ 60 点

<電力・管理科目>

[問 1 の標準解答]

(1) 限界比速度は、 $n_s = \frac{23\,000}{H+30} + 40$ となることから、 H ：有効落差[m]に 162 m を代入して、計算すると、この発電所における水車の限界比速度は 159.8 となる。

また、有効落差 H [m]、定格回転速度 N [min^{-1}]、定格出力 P [kW]のランナの比速度 n_s は、

$$n_s = \frac{N \times P^{\frac{1}{2}}}{H^{\frac{5}{4}}}$$

で表されることから、適用可能上限となる回転速度 N_{\max} [min^{-1}]は、

$$N_{\max} = \frac{159.8 \times H^{\frac{5}{4}}}{P^{\frac{1}{2}}} = \frac{159.8 \times H \times H^{\frac{1}{4}}}{P^{\frac{1}{2}}}$$

となるので、

$$\begin{aligned} N_{\max} &= \frac{159.8 \times 577.95}{200} \\ &= 461.78 \end{aligned}$$

したがって、 $N_{\max} = 461 \text{ min}^{-1}$ となる。・・・(答)

(2) 450 min^{-1} ・・・(答)

周波数が 60 Hz という条件下で、選定できる定格回転速度は、低い順に 400 min^{-1} 、 450 min^{-1} 、 514 min^{-1} 、・・・となるが適用可能な回転速度の上限値が 461 min^{-1} のため、 450 min^{-1} となる。

〔選定理由〕

フランス水車の比速度としては、180 程度で最も高い効率が得られること、また、水車及び発電機は高速化することでの小型化によるコスト低減が図れることから、できるだけ適用限界の回転速度に近い定格回転速度を選定することが望ましい。

(3) 周波数 f と定格回転速度 N と発電機の極数 p の関係は、

$$f = \frac{p}{2} \times \frac{N}{60} \text{ で表されることから、}$$

各値を代入して、

$$p = \frac{60 \times 60 \times 2}{450} = 16$$

よって、発電機の極数は 16・・・(答)

〔問 2 の標準解答〕

(1)

- ・役割：計器用変成器は、保護リレーや計器を高圧回路から絶縁し、電流や電圧を適当な大きさに小さく変成して継電器や計器に与えること。
- ・最も代表的な変成器：CT(変流器)，VT(計器用変圧器)。
- ・比誤差 ε は次式で表される。

$$\varepsilon = \frac{K_n - K}{K} \times 100 [\%]$$

(2)

- ・保護区間内部の事故に対してのみ正動作し、誤不動作をしないこと。
- ・保護区間外部の事故に対しては正不動作し、誤動作をしないこと。
- ・点検や自動監視を行うこと。
- ・故障率が低いこと。
- ・冗長化されていること。

(3)

- ・5サイクル及び3サイクル。
- ・引外しコイル。(トリップコイル, TCも可)
- ・引外しコイルと投入コイルが同時に付勢されたとしても, 投入動作と無関係に自由に引外される機能のこと。投入操作と事故が同時に発生した場合に開放を優先し, 投入・開放を繰り返さないことにより遮断器の損傷・大事故を防ぐ目的で用いられる。

[問3の標準解答]

(1)

$a = e^{j\frac{2\pi}{3}}$ として,

$$\dot{I}_a = \dot{I}_g = \dot{I}_0 + \dot{I}_1 + \dot{I}_2 \dots\dots\dots ①$$

$$\dot{I}_b = \dot{I}_0 + a^2 \dot{I}_1 + a \dot{I}_2 = 0 \dots\dots\dots ②$$

$$\dot{I}_c = \dot{I}_0 + a \dot{I}_1 + a^2 \dot{I}_2 = 0 \dots\dots\dots ③$$

②式, ③式から,

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_1 = \dot{I}_2 \dots\dots\dots ④$$

そのため, $\dot{V}_a = \dot{V}_0 + \dot{V}_1 + \dot{V}_2$ から,

$$\dot{V}_a = -\dot{Z}_0 \dot{I}_0 + \dot{E}_a - \dot{Z}_1 \dot{I}_1 - \dot{Z}_2 \dot{I}_2 = \dot{I}_g R_f \dots\dots\dots ⑤$$

から,

$$\dot{I}_g = 3\dot{I}_0 = \frac{3\dot{E}_a}{3R_f + \dot{Z}_0 + \dot{Z}_1 + \dot{Z}_2} \dots\dots\dots ⑥$$

... (答)

(2)

$j\omega C = j \times 2 \times \pi \times 50 \times 0.005 \times 10^{-6} \times 20 = j31.416 \times 10^{-6}$ から, 零相インピーダンス \dot{Z}_0 は,

$$\begin{aligned}\dot{Z}_0 &= \frac{1}{\frac{1}{2000} + \frac{1}{2000} + j31.416 \times 10^{-6}} \\ &= \frac{1}{0.001 + j31.416 \times 10^{-6}} \\ &= 999.01 - j31.385 \\ &\therefore 999 - j31.4 \Omega \dots (\text{答})\end{aligned}$$

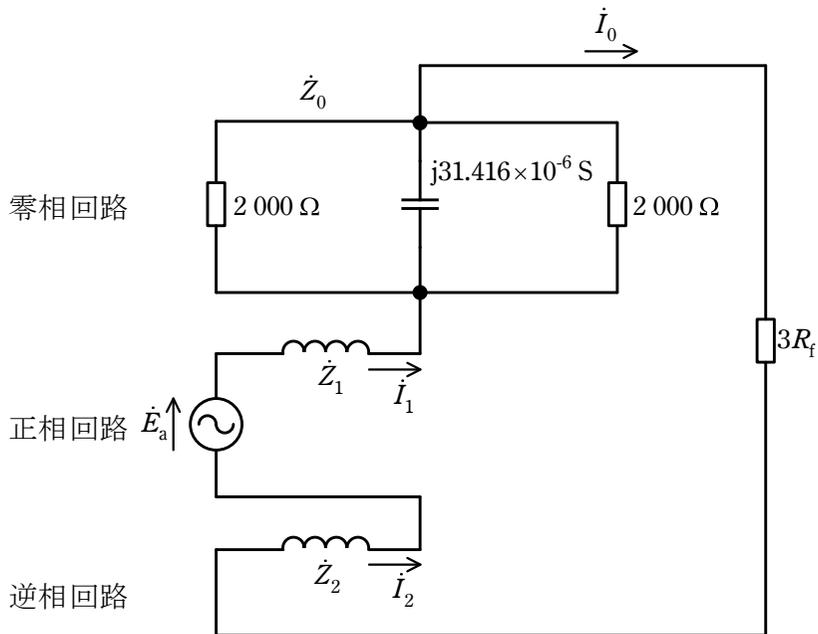
また、対地静電容量以外のインピーダンスは無視できるため、正相インピーダンス \dot{Z}_1 、逆相インピーダンス \dot{Z}_2 は、

$$\dot{Z}_1 = 0 \Omega \dots (\text{答})$$

$$\dot{Z}_2 = 0 \Omega \dots (\text{答})$$

(3)

各対称分インピーダンスは以下の等価回路となる。



地絡電流の大きさ $|\dot{I}_g|$ [A] は、

$$|\dot{I}_g| = \left| \frac{3 \times \frac{66\,000}{\sqrt{3}}}{3 \times 10 + 999.01 - j31.385} \right|$$

$$= 111.04$$

∴ 111 A …… (答)

[問 4 の標準解答]

(1) 単相 2 線式(200 V と 100 V)と単相 3 線式を図 1 に示す。単相 3 線式では、図 1 に示すように電源の単相変圧器の中性点から中性線を引き出し、両外側の電圧線とともに 3 線で負荷に電力供給を行う。以下の特徴を持つ。

利便性：一つの系統から単相の 100 V と 200 V を取り出すことができ、100 V と 200 V のどちらの機器も使用できる。

安全性：中性線が接地されているので、200 V 回路の対地電位は 100 V となることから、200 V 回路の安全性が高い。

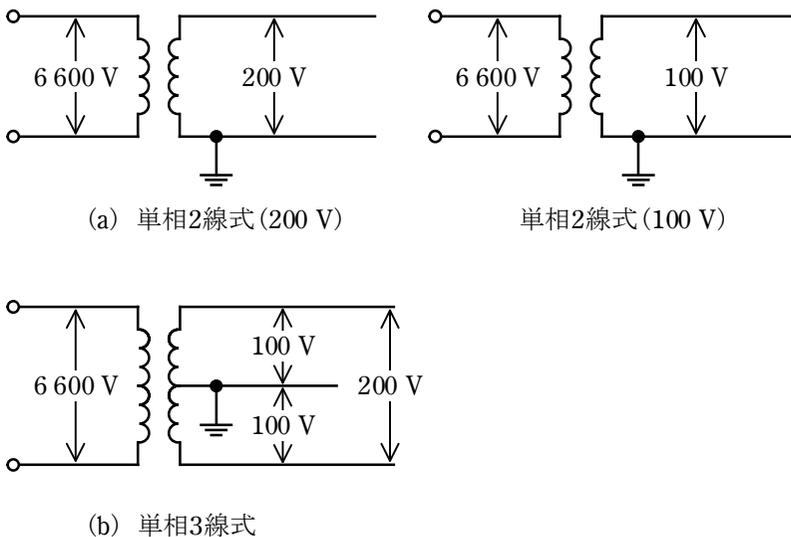


図 1 低圧電気方式(単相式)

(2) 電圧降下

単相 2 線式, 単相 3 線式の電線 1 条当たりの抵抗を $R[\Omega]$, 負荷の力率を $\cos\theta$ (θ は非常に小さいものとする) とし, それぞれの電流を $I_2, I_3[A]$, 100 V 負荷端で

の電圧降下を ΔV_2 , ΔV_3 [V] とする。題意より単相 3 線式は中性線に電流が流れないので、電圧降下は 1 線分のみとなる (図 2)。よって、各電圧降下は、

$$\Delta V_2 = 2I_2 R \cos \theta$$

$$\Delta V_3 = I_3 R \cos \theta$$

ΔV_3 と ΔV_2 の比をとり、負荷電力が等しい条件 $I_2 = 2I_3$ を代入すると、

$$\frac{\Delta V_3}{\Delta V_2} = \frac{I_3}{2I_2} = \frac{1}{2} \times \frac{1}{2} = \frac{1}{4}$$

となる。すなわち、単相 3 線式の電圧降下は単相 2 線式の $\frac{1}{4}$ となる。

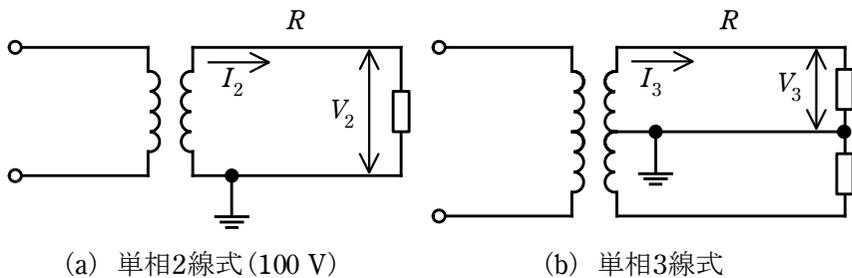


図 2 単相 2 線式と単相 3 線式

(3) 中性線の欠相により発生する障害

二つの 100 V 回路の負荷が不平衡である時は、中性線が断線していると回路ごとの電圧に不平衡が生じることから、一方の 100 V 回路で過電圧が生じ、他の回路では電圧が低下して、機器類の損傷・焼損及び誤動作などの障害を起こす恐れがある。

中性線欠相の発生原因

中性線欠相の主な発生原因は、分電盤内の開閉器の端子等において接触が不完全になるものである。この接触不良は、工事施工不良によるねじ締め不完全や、導体温度変化による導体の膨張・収縮や振動等により経年的な接触不完全への発展が考えられる。

防止対策 (以下の具体的対策例の中から二つ記載されていればよい)

①開閉器類端子部の構造の改善

2 ねじ方式，圧着端子方式等で長時間使用してもねじのゆるみが生じにくい構造とする。

②欠相保護機能付き漏電遮断器の採用

中性線欠相による過電圧発生時に回路を遮断する機能を持たせた漏電遮断器を使用する。

③開閉器類設置時の対策

高温・多湿の場所，振動やじん埃のある場所への設置を極力避ける。また，端子締め付けに適した工具を用い，確実に施工・確認をする。

④既設開閉器類に対する対策

端子部の点検のほか，異臭，テレビ・ラジオの雑音，機器類の運転の異常，照明器具の明るさの異常などから，不良個所の早期発見に努め，処置する。

⑤バランサの採用

低圧線の末端にバランサ(単巻変圧器)を設置することで，中性線断線時の電圧不平衡を大幅に軽減する。

[問5の標準解答]

(1) 以下から二つ記載されていればよい。

(電圧の種類)

- ①異常時誘導電圧
- ②常時誘導電圧
- ③誘導雑音電圧

(発生原理)

- ①異常時誘導電圧：送電線に一線地絡事故が発生した場合に地絡電流が大地帰路電流となって流れることにより，隣接する通信線路と大地間に誘起される電圧
- ②常時誘導電圧：送電線の常時運転時に，各相の負荷電流の不均衡や各相導体と通信線の離隔の不整合によって誘起される電圧

③誘導雑音電圧：送電線に流れる常時の高調波電流に起因して生じる電圧

(2) 以下の主な対策から二つ記載されていればよい。

- ①架空地線の条数を増やす。
- ②架空地線に導電率のよい鋼心イ号アルミより線やアルミ被鋼より線を使用する。
- ③送電線をねん架する。
- ④送電系統の保護継電方式に高速遮断方式を採用する。
- ⑤遮へい線を設置する。
- ⑥送電線のルートを変更し、お互いの離隔距離を大きくする。
- ⑦中性点抵抗接地方式の抵抗値を大きくする。
- ⑧中性点接地方式に消弧リアクトル接地方式を採用する。

[問 6 の標準解答]

(1)

負荷容量 P_1 の遅れ無効電力は、

$$Q_{L1} = P_1 \times \tan \theta_1 = P_1 \times \frac{\sin \theta_1}{\cos \theta_1} = 6\,000 \times \frac{0.6}{0.8} = 4\,500 \text{ kvar}$$

増設負荷 P_2 の遅れ無効電力は、

$$Q_{L2} = P_2 \times \tan \theta_2 = P_2 \times \frac{\sin \theta_2}{\cos \theta_2} = 4\,500 \times \frac{0.8}{0.6} = 6\,000 \text{ kvar}$$

力率改善用コンデンサ Q_1 は投入されているので、遅れ無効電力の合計は、

$$Q_L = 4\,500 + 6\,000 - 2\,000 = 8\,500 \text{ kvar}$$

したがって、合成された負荷の皮相電力は、

$$S_L = \sqrt{(P_1 + P_2)^2 + Q_L^2} = \sqrt{(6\,000 + 4\,500)^2 + 8\,500^2} = 13\,509 \text{ kV} \cdot \text{A}$$

これは、変圧器の容量を超えているので過負荷となる。

変圧器を過負荷にしないためには、負荷の皮相電力を変圧器容量以下とすればよい。

そのために必要な力率改善用コンデンサ容量を Q_2 [kvar] とすると、次式が成

立する。

$$\sqrt{(P_1 + P_2)^2 + (Q_L - Q_2)^2} \leq P_T$$

よって、

$$\begin{aligned} Q_2 &\geq Q_L - \sqrt{P_T^2 - (P_1 + P_2)^2} \\ &= 8\,500 - \sqrt{12\,000^2 - (6\,000 + 4\,500)^2} = 8\,500 - 5\,809.5 = 2\,690.5 \text{ kvar} \end{aligned}$$

変圧器を過負荷にしないためには、

$$Q_2 = 2.70 \times 10^3 \text{ kvar 必要} \dots (\text{答})$$

このとき、負荷の有効電力の合計は、

$$P_1 + P_2 = 6\,000 + 4\,500 = 10\,500 \text{ kW}$$

負荷の皮相電力の合計は、変圧器容量と同じで、

$$P_T = 12\,000 \text{ kV}\cdot\text{A}$$

よって、総合力率は、

$$\cos \theta_S = \frac{P_1 + P_2}{P_T} = \frac{10\,500}{12\,000} = 0.875 \dots (\text{答})$$

(2) 図 2 に P_2 [kW], Q_2 [kvar] のベクトル図と, 力率角 θ_2 を追記する。

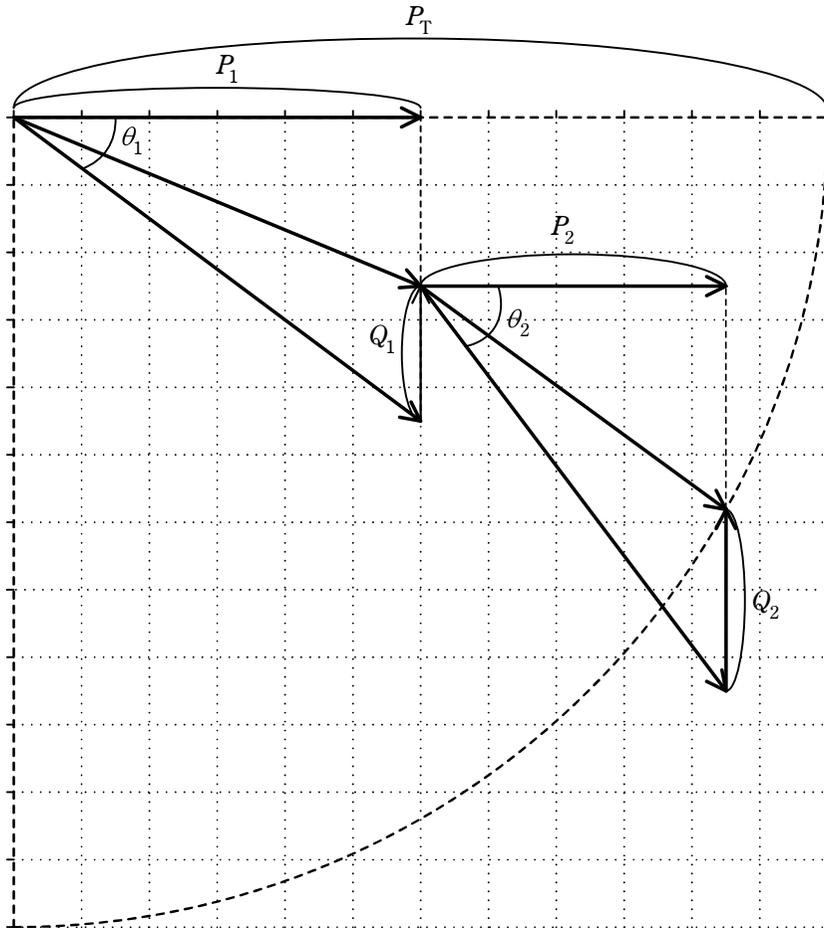


図 2 [追記をした図]

(3) 総合力率 $\cos\theta_s = 0.95$ にするために必要な力率改善用コンデンサ容量を Q_2 [kvar] とすると, 次式が成立する。

$$\tan\theta_s = \frac{Q_L - Q_2}{P_1 + P_2}$$

よって,

$$\begin{aligned} Q_2 &= Q_L - (P_1 + P_2) \times \tan \theta_S = Q_L - (P_1 + P_2) \times \frac{\sqrt{1 - \cos^2 \theta_S}}{\cos \theta_S} \\ &= 8\,500 - (6\,000 + 4\,500) \times \frac{\sqrt{1 - 0.95^2}}{0.95} = 8\,500 - 3\,451.2 = 5\,048.8 \text{ kvar} \end{aligned}$$

$$Q_2 = 5.05 \times 10^3 \text{ kvar} \quad \text{必要} \cdot \cdot \cdot \quad (\text{答})$$