

●平成23年度第一種電気主任技術者二次試験標準解答

配点：一題当たり 30 点

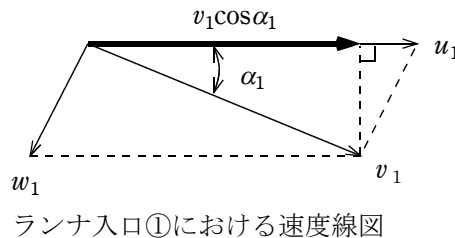
電力・管理科目 4 題× 30 点＝ 120 点

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) 流速  $v_1$  [m/s] とランナ周速度  $u_1$  [m/s] のなす角が  $\alpha_1$  [rad] であることから、ランナ入口①における周速度方向の流速の大きさは  $v_1 \cos \alpha_1$  [m/s] となる。



- (2) 流水の回転方向の単位時間当たりの運動量のモーメントは、ランナ入口①では  $\rho q_v r_1 v_1 \cos \alpha_1$  [N・m]、ランナ出口②では  $\rho q_v r_2 v_2 \cos \alpha_2$  [N・m] となることから、ランナに与えるトルク  $T$  は次式で表される。

$$T = \rho q_v (r_1 v_1 \cos \alpha_1 - r_2 v_2 \cos \alpha_2) \text{ [N・m]}$$

- (3) ランナ入口①と出口②における周速度、角速度  $\omega$  [rad/s] 及びランナ半径には、それぞれ  $\omega r_1 = u_1$  [m/s]、 $\omega r_2 = u_2$  [m/s] の関係があることから、ランナ出力は次式となる。

$$P = T\omega = \rho q_v (u_1 v_1 \cos \alpha_1 - u_2 v_2 \cos \alpha_2) \times 10^{-3} \text{ [kW]}$$

(4) 流量  $q_v$  [m<sup>3</sup>/s], 有効落差  $H$  [m] のときの水車入力は  $\rho g q_v H \times 10^{-3}$  [kW]

なので, ランナ効率  $\eta$  [%] は次式で表される。

$$\begin{aligned}\eta &= \frac{P}{\rho g q_v H \times 10^{-3}} \times 100[\%] \\ &= \frac{u_1 v_1 \cos \alpha_1 - u_2 v_2 \cos \alpha_2}{g H} \times 100[\%]\end{aligned}$$

このため,  $\alpha_2 = \frac{\pi}{2}$  のときが効率最大となり, 理論上の最大効率は次式となる。

$$\eta_{\max} = \frac{u_1 v_1 \cos \alpha_1}{g H} \times 100[\%]$$

(5) まず, ランナ入口①の周速度  $u_1$  [m/s] を求める。

ランナ入口半径 0.5 [m], ランナの回転速度 10 [s<sup>-1</sup>] より, 周速度  $u_1$  [m/s] は,

$$u_1 = 2 \times \pi \times 0.5 \times 10 = 31.42 \text{ [m/s]}$$

よって, 理論上の最大効率  $\eta_{\max}$  [%] は,

$$\begin{aligned}\eta_{\max} &= \frac{u_1 v_1 \cos \alpha_1}{g H} \times 100[\%] \\ &= \frac{31.42 \times 35 \times \frac{\sqrt{3}}{2}}{9.8 \times 100} \times 100 = 97.18[\%] \rightarrow 97.2[\%]\end{aligned}$$

[問2の標準解答]

(1) 起動時間

ガスタービンを使用した小容量機の組合せのため負荷変化率が大きくとれ、また、蒸気タービンの分担出力がプラント全体の $\frac{1}{3}$ と小さく汽力発電と比べて蒸気タービンが小形となるため、短時間での起動が可能である。8時間停止後の起動時間は、例えば1000〔MW〕級汽力発電プラントで約3時間であるが、一軸形コンバインドサイクル発電プラントの場合は1軸当たり約1時間である。

(2) 温排水量

コンバインドサイクル発電プラントの蒸気タービンの入口蒸気条件は、汽力発電プラントに比べて圧力・温度ともに低くなり、分担出力はプラント全体の $\frac{1}{3}$ と小さいため、温排水量は汽力発電プラントの6割程度となる。

(3) 大気温度と最大出力との関係

コンバインドサイクル発電プラントはガスタービンを主体に構成されるため、最大出力は大気温度により大きく変化し、大気温度が低いほど出力が大きくなる。

ガスタービンは、高温域における耐久性の観点から、第一段動翼入口ガス温度の上限を定めて運転される。一方、ガスタービンの圧縮機の吸込空气体積流量は大気温度に関係なくほぼ一定であるため、大気温度が下がって空気密度が増加すると、吸込空気質量流量は増加する。また、大気温度の低下により圧縮機の燃焼用空気の温度が低下するため、ガスタービン入口ガス温度の上限値までの加熱代が大きくなり、吸込質量流量の増加とあいまって、より多くの燃料が投入可能となり、ガスタービン最大出力が増加する。

蒸気タービンについては、ガスタービン最大出力の増加による排ガス量及び熱量の増大により、排熱回収ボイラでの蒸気発生量が増加し、出力が若干増加する。

[問3の標準解答]

基準容量を  $P_B=100$  [MV・A] として、各%インピーダンスを基準容量ベースの単位法に換算すると、

$$x_{12} = X_{12} \times \frac{P_B}{100} \times \frac{1}{100} = 16 \times \frac{100}{100} \times \frac{1}{100} = 0.16[\text{p.u.}]$$

$$x_{31} = X_{31} \times \frac{P_B}{100} \times \frac{1}{100} = 8 \times \frac{100}{100} \times \frac{1}{100} = 0.08[\text{p.u.}]$$

$$x_{23} = X_{23} \times \frac{P_B}{30} \times \frac{1}{100} = 3 \times \frac{100}{30} \times \frac{1}{100} = 0.1[\text{p.u.}]$$

次に、三巻線変圧器の一次側、二次側、三次側の各インピーダンスを  $x_1, x_2, x_3$  とすると、

$$x_1 = \frac{x_{12} + x_{31} - x_{23}}{2} = \frac{0.16 + 0.08 - 0.1}{2} = 0.07[\text{p.u.}]$$

$$x_2 = \frac{x_{12} + x_{23} - x_{31}}{2} = \frac{0.16 + 0.1 - 0.08}{2} = 0.09[\text{p.u.}]$$

$$x_3 = \frac{x_{23} + x_{31} - x_{12}}{2} = \frac{0.1 + 0.08 - 0.16}{2} = 0.01[\text{p.u.}]$$

負荷の無効電力、コンデンサの無効電力を単位法表示したものをそれぞれ  $q, q_C$  とすると、

$$q = \frac{Q}{P_B} = P \times \frac{\sqrt{1 - \cos^2 \theta}}{\cos \theta} \times \frac{1}{P_B} = 10 \times \frac{\sqrt{1 - 0.8^2}}{0.8} \times \frac{1}{100} = 0.075[\text{p.u.}]$$

$$q_C = \frac{Q_C}{P_B} = \frac{-30}{100} = -0.3[\text{p.u.}]$$

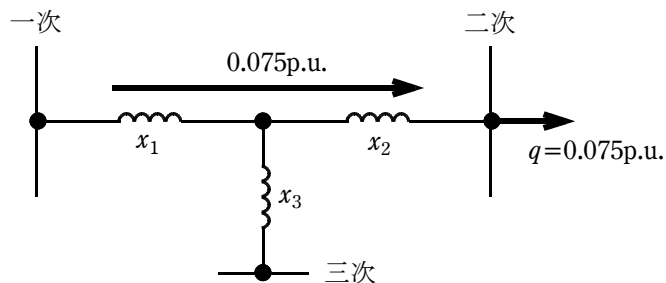
(a) コンデンサを設置しない場合

等価回路と無効電力の流れは下図のようになるため、二次側までの電圧降下を  $\Delta v$  とすると、

$$\Delta v = (x_1 + x_2) \times q = (0.07 + 0.09) \times 0.075 = 0.012[\text{p.u.}]$$

したがって、二次母線電圧  $V_2$  は、

$$V_2 = \left( \frac{V_1}{154} - \Delta v \right) \times 77 = \left( \frac{150}{154} - 0.012 \right) \times 77 = 74.07 \rightarrow 74.1[\text{kV}]$$



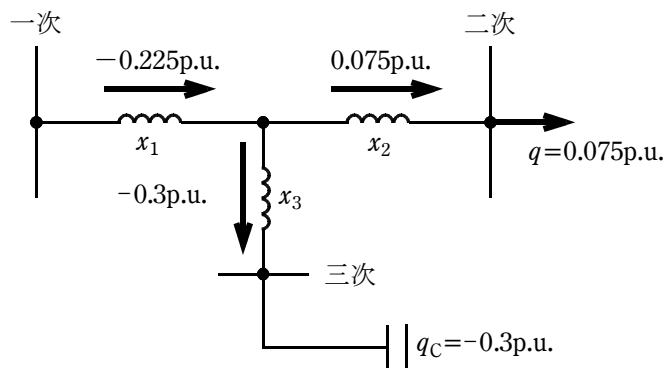
(b) コンデンサを設置した場合

等価回路と無効電力の流れは下図のようになるため、二次側までの電圧降下を  $\Delta v$  とすると、

$$\Delta v = x_1 \times (q + q_C) + x_2 \times q = 0.07 \times (0.075 - 0.3) + 0.09 \times 0.075 = -0.009 [\text{p.u.}]$$

したがって、二次母線電圧  $V_2$  は、

$$V_2 = \left( \frac{V_1}{154} - \Delta v \right) \times 77 = \left( \frac{150}{154} + 0.009 \right) \times 77 = 75.69 \rightarrow 75.7 [\text{kV}]$$



答 コンデンサを設置しない場合 74.1 [kV]

コンデンサを設置した場合 75.7 [kV]

[別解]

基準容量を  $P_B=100$  [MV·A] として、各%インピーダンスを基準容量ベースの単位法に換算すると、

$$x_{12} = X_{12} \times \frac{P_B}{100} \times \frac{1}{100} = 16 \times \frac{100}{100} \times \frac{1}{100} = 0.16[\text{p.u.}]$$

$$x_{31} = X_{31} \times \frac{P_B}{100} \times \frac{1}{100} = 8 \times \frac{100}{100} \times \frac{1}{100} = 0.08[\text{p.u.}]$$

$$x_{23} = X_{23} \times \frac{P_B}{30} \times \frac{1}{100} = 3 \times \frac{100}{30} \times \frac{1}{100} = 0.1[\text{p.u.}]$$

次に、三巻線変圧器の一次側、二次側、三次側の各インピーダンスを  $x_1, x_2, x_3$  とすると、

$$x_1 = \frac{x_{12} + x_{31} - x_{23}}{2} = \frac{0.16 + 0.08 - 0.1}{2} = 0.07[\text{p.u.}]$$

$$x_2 = \frac{x_{12} + x_{23} - x_{31}}{2} = \frac{0.16 + 0.1 - 0.08}{2} = 0.09[\text{p.u.}]$$

$$x_3 = \frac{x_{23} + x_{31} - x_{12}}{2} = \frac{0.1 + 0.08 - 0.16}{2} = 0.01[\text{p.u.}]$$

また、一次電圧を  $\dot{V}_1$ 、二次電圧を  $\dot{V}_2$ 、三次電圧を  $\dot{V}_3$ 、負荷電流を  $\dot{I}$ 、コンデンサ電流を  $\dot{I}_C$  とすると、図 1 の等価回路が成り立つ。ここで、等価回路の中心点の電圧を  $\dot{V}_n$  としている。さらに、 $\dot{V}_2$  を基準ベクトルとして、図 2 のベクトル図が成立する。

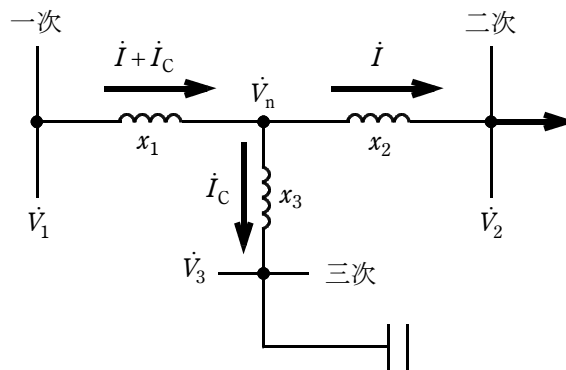


図 1

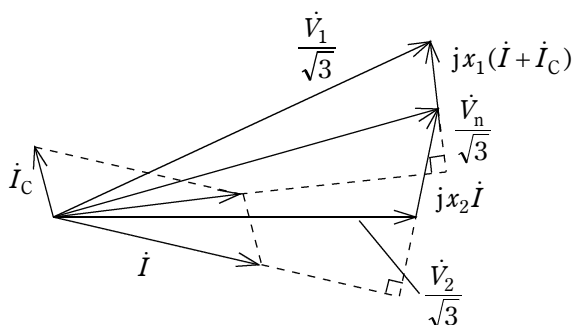


図 2

ここで、負荷の無効電力を  $Q$ 、コンデンサの無効電力を  $Q_C$  とすると、次の式が成り立つ。

$$\frac{\dot{V}_n}{\sqrt{3}} - \frac{\dot{V}_2}{\sqrt{3}} = jx_2 \dot{I} \quad \dots \textcircled{1}$$

$$P + jQ = \sqrt{3} \dot{V}_2 \bar{\dot{I}} \quad \dots \textcircled{2}$$

$$\frac{\dot{V}_1}{\sqrt{3}} - \frac{\dot{V}_n}{\sqrt{3}} = jx_1 (\dot{I} + \dot{I}_C) \quad \dots \textcircled{3}$$

$$P + j(Q + Q_C) = \sqrt{3} \dot{V}_n (\bar{\dot{I}} + \bar{\dot{I}}_C) \quad \dots \textcircled{4}$$

$$jQ_C = \sqrt{3} \dot{V}_3 \bar{\dot{I}}_C \quad \dots \textcircled{5}$$

(a) コンデンサを設置しない場合

$Q_C = 0$ ,  $\dot{I}_C = 0$  であるから、①～⑤式より次式が成り立つ。

$$\frac{\dot{V}_1}{\sqrt{3}} - \frac{\dot{V}_2}{\sqrt{3}} = j(x_1 + x_2) \dot{I} = jx_{12} \dot{I} \quad \dots \textcircled{6}$$

$$\dot{I} = \frac{P - jQ}{\sqrt{3} \dot{V}_2} \quad \dots \textcircled{7}$$

ここで、一次電圧、二次電圧、三次電圧の基準値を 154 [kV]、77 [kV]、22 [kV] とすると、題意より負荷電流は二次母線電圧が 77 [kV] のとき 10 [MW] となる電流とみなしてよいことから、⑦式において  $V_2 = 1$  [p.u.] とすると、

$$\dot{I} = \frac{P - jQ}{\sqrt{3}} [\text{p.u.}] \quad \dots \textcircled{8}$$

⑧式を⑥式に代入し  $V_1$  について整理すると、

$$\dot{V}_1 = \dot{V}_2 + x_{12}Q + jx_{12}P$$

$$V_1^2 = V_2^2 + 2x_{12}QV_2 + x_{12}^2(P^2 + Q^2) \quad \text{これより}$$

$$V_2^2 + 2x_{12}QV_2 + x_{12}^2(P^2 + Q^2) - V_1^2 = 0$$

$$\therefore V_2 = -x_{12}Q + \sqrt{V_1^2 - x_{12}^2P^2} \quad \dots \textcircled{9}$$

$V_2$  は二つの解が存在するが、小さい値の解は電圧不安定となる解であるので、大きい値の解を採用した。

ここで、負荷の有効電力、無効電力をそれぞれ単位法で表すと、

$$P[\text{p.u.}] = \frac{P}{P_B} = \frac{10}{100} = 0.1[\text{p.u.}]$$

$$Q[\text{p.u.}] = \frac{Q}{P_B} = P \times \frac{\sqrt{1 - \cos^2 \theta}}{\cos \theta} \times \frac{1}{P_B} = 10 \times \frac{\sqrt{1 - 0.8^2}}{0.8} \times \frac{1}{100} = 0.075[\text{p.u.}]$$

題意より有効電力による電圧降下分は無視できるので、 $P=0$  [p.u.] として計算する。

また、一次電圧は

$$V_1 = \frac{150}{154} = 0.9740[\text{p.u.}]$$

⑨式より、

$$V_2 = -0.16 \times 0.075 + \sqrt{0.974^2 - 0.16^2 \times 0^2} = 0.962[\text{p.u.}]$$

変圧器の使用タップは 154 [kV]、77 [kV] であるから、二次母線電圧は

$$V_2 = 0.962 \times 77 = 74.074 \rightarrow 74.1[\text{kV}]$$



(b) コンデンサを設置した場合

$Q_C = 30$  [MVar] であるから、単位法で表すと

$$Q_C [\text{p.u.}] = \frac{Q_C}{P_B} = \frac{-30}{100} = -0.3 [\text{p.u.}]$$

ここで、題意より負荷電流は二次母線電圧が 77 [kV] のとき 10 [MW] となる電流、コンデンサの電流は三次母線電圧が 22 [kV] のとき 30 [MVar] となる電流とみなしてよいことから、③～⑤式より  $V_1$  と  $V_n$  との間に⑨式と同様な以下の式が成立する。

$$V_n = -x_1(Q + Q_C) + \sqrt{V_1^2 - x_1^2 P^2} \quad \dots \textcircled{10}$$

同様に、①、②式より  $V_n$  と  $V_2$  との間に⑨式と同様な以下の式が成立する。

$$V_2 = -x_2 Q + \sqrt{V_n^2 - x_2^2 P^2} \quad \dots \textcircled{11}$$

⑩式より、

$$V_n = -0.07 \times (0.075 - 0.3) + \sqrt{0.974^2 - 0.07^2 \times 0^2} = 0.9898 [\text{p.u.}]$$

⑪式より、

$$V_2 = -0.09 \times 0.075 + \sqrt{0.9898^2 - 0.09^2 \times 0^2} = 0.9831 [\text{p.u.}]$$

変圧器の使用タップは 154 [kV]、77 [kV] であるから、二次母線電圧は

$$V_2 = 0.9831 \times 77 = 75.69 \rightarrow 75.7 [\text{kV}]$$

答 コンデンサを設置しない場合 74.1 [kV]

コンデンサを設置した場合 75.7 [kV]

[問4の標準解答]

(1) 低圧制御回路の絶縁設計に配慮すべき電圧サージとその制御回路への侵入経路：

低圧制御回路の絶縁設計で配慮すべき異常電圧はサージ性電圧であり，雷サージ，主回路開閉サージ，直流回路開閉サージに分類され，下記のように低圧制御回路に侵入する。

①雷サージ：

- ・電気所の母線，接地線などに雷サージ電流が流れ，近接する制御ケーブルに誘導により移行する。
- ・計器用変成器の一次側雷サージ電圧，電流が二次回路に誘導により移行する。
- ・電気所の接地系に雷サージ電流が流入し，流入点の接地電位が上昇，近接する制御ケーブルに誘導により移行する。

②主回路開閉サージ：

- ・遮断器や断路器の開閉で主回路に発生した開閉サージが計器用変成器の二次回路に誘導により移行する。
- ・GIS 機器において，発生した開閉サージが接地電位を変動させ，近接する制御ケーブルに誘導により移行する。

③直流回路開閉サージ：

- ・低圧制御回路である直流回路の容量性や誘導性の負荷を接点で開放するときに発生する。

上記の三つの他，次の「地絡サージ」も別解とする。

④地絡サージ：

- ・ケーブル系統における地絡事故初期のサージ電流が計器用変成器の二次回路に誘導により移行する。

(2) サージへの対応策：

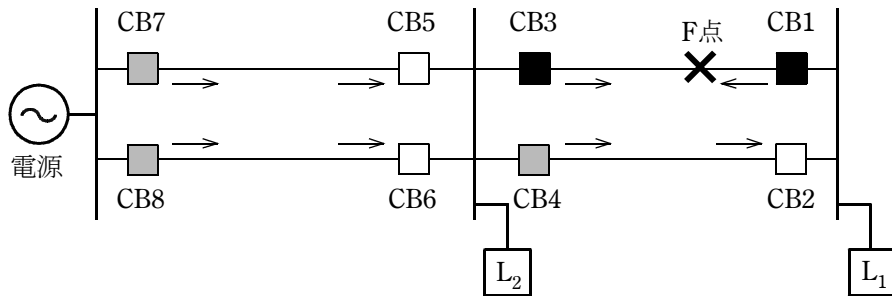
(a) サージ発生源における対策：

- ① 金属シース付きケーブルを採用し、シースの両端を接地する。雷サージ、断路器開閉サージを低減する最も効果的な対策である。
- ② 低圧制御ケーブルは施工時に高電圧主回路の導線から距離を置く。
- ③ 直流回路では、リレー回路のコイルに並列コンデンサやダイオードなどを接続し、開閉サージ電圧の発生を抑制する。

(b) 配電盤における対策：

- ① 避雷器又はコンデンサなどのサージ吸収装置を盤側端子に接続し、盤内へのサージ侵入を阻止する。
- ② 絶縁変圧器、中和コイルなどによって、盤側へのサージ侵入を阻止する。

[問 5 の標準解答]



上図のように、F点で事故があると、各CBには電源から矢印の方向に事故電流が流れる。動作、誤不動作する対象はCB1とCB3の主保護、CB4、CB7とCB8の後備保護である。

すべて正動作の場合は、「CB1が主保護リレー動作で遮断、かつCB3が主保護リレー動作で遮断」であるが、いずれか不具合のときは、以下のケースがある。

- ① 「CB1が誤不動作、CB3が正動作で遮断」の場合、CB4の後備保護リレーが動作するが、「CB4が正動作で遮断」すればL<sub>1</sub>のみが停電する。
- ② 「CB1が誤不動作、CB3が正動作で遮断」で、かつ「CB4が誤不動作」の場合、CB7の後備保護リレー及びCB8の後備保護リレーが動作するが、「CB7及びCB8が正動作で遮断」すればL<sub>1</sub>とL<sub>2</sub>の両方が停電する。
- ③ 「CB1が誤不動作、CB3が正動作で遮断」で、かつ「CB4が誤不動作」し、かつ「CB7又はCB8が誤不動作」の場合、電源の保護リレーが動作して停電するため、②と同じくL<sub>1</sub>とL<sub>2</sub>の両方が停電する。
- ④ 「CB1が正動作で遮断、CB3が誤不動作」の場合、CB7の後備保護リレー及びCB8の後備保護リレーが動作するが、「CB7及びCB8が正動作で遮断」すればL<sub>1</sub>とL<sub>2</sub>の両方が停電する。
- ⑤ 「CB1が正動作で遮断、CB3が誤不動作」で、かつ「CB7又はCB8が誤不動作」の場合は、電源の保護リレーが動作して④と同じくL<sub>1</sub>とL<sub>2</sub>の両方が停電する。

⑥ 「CB1 が誤不動作，かつ CB3 が誤不動作」の場合，CB4 の後備保護リレーと，CB7 の後備保護リレー及び CB8 の後備保護リレーが動作するが，CB4 の正動作／不動作にかかわらず，④と⑤のケースと同じく CB7 及び CB8 の遮断，又は電源の停電によって L<sub>1</sub> と L<sub>2</sub> の両方が停電する。

供給支障が生じない確率は，「CB1 正動作，CB3 正動作」の確率であり，

$$p_0 = (1 - 0.01) \times (1 - 0.01) = 0.99 \times 0.99 = \underline{0.9801}$$

L<sub>1</sub> のみ供給支障となるのは，①の「CB1 誤不動作，CB3 正動作，CB4 正動作」のときのみであり，その確率は，

$$\begin{aligned} p_1 &= 0.01 \times (1 - 0.01) \times (1 - 0.01) \\ &= 0.01 \times 0.99 \times 0.99 = \underline{0.0098} \end{aligned}$$

L<sub>1</sub> と L<sub>2</sub> 両方が供給支障となるのは，②，③のケースより，「CB1 誤不動作，CB3 正動作，CB4 誤不動作」のとき。

$$\begin{aligned} p_2 &= 0.01 \times (1 - 0.01) \times 0.01 \\ &= 0.01 \times 0.99 \times 0.01 = 0.0001 \end{aligned}$$

また，④，⑤，⑥のケースより，「CB3 誤不動作」（CB1 の正動作又は誤不動作，CB4 の正動作又は誤不動作いずれの確率も含む）のときも，L<sub>1</sub> と L<sub>2</sub> 両方が供給支障となる。

$$p_3 = 0.01$$

したがって二つの確率より，

$$p_2 + p_3 = \underline{0.0101}$$

答 供給支障が生じない確率：0.9801

L<sub>1</sub> のみが供給支障となる確率：0.0098

L<sub>1</sub> と L<sub>2</sub> 両方が供給支障となる確率：0.0101

[問 6 の標準解答]

A : 種類 }  
B : 量 } 順不同  
C : 水分量 }  
D : 体積抵抗率 } 順不同  
E : 誘電正接 }

F : 絶縁紙のずれや損傷

G : ケーブル部の部分放電発生位置の検出

H : 断線事故

$$I : \frac{2L \cdot R_1}{R_1 + R_2}$$

[別解]

$$I : \frac{2L \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

< 機械・制御科目 >

[問 1 の標準解答]

(1) 同期ワットで表したトルクは二次入力であるから

$$T_0 = 3 \frac{r_2}{s_0} I_2'^2 = 3 \frac{r_2}{s_0} \frac{E_2^2}{\left(\frac{r_2}{s_0}\right)^2 + x_2^2} \quad [\text{W}] \quad \dots\dots\dots ①$$

となる。

(2) 滑り  $s$  における二次電流を  $\dot{I}_2'$  とすると等価回路から

$$\dot{I}_2' = \frac{E_2 - \frac{V_2}{s}}{\frac{r_2}{s} + jx_2} = \frac{E_2 - \frac{V_2}{s}}{Z_2^2} \left( \frac{r_2}{s} - jx_2 \right) \quad \dots\dots\dots ②$$

である。ただし、 $Z_2 = \sqrt{\left(\frac{r_2}{s}\right)^2 + x_2^2}$  とした。二次入力  $P_{2i}$  は

$$P_{2i} = 3E_2 \text{Re}(\dot{I}_2') = 3E_2 \frac{r_2}{s} \frac{E_2 - \frac{V_2}{s}}{Z_2^2} \quad \dots\dots\dots ③$$

となる。これから二次銅損  $P_{\text{los}}$  及び主電源から二次励磁電源に供給する電力  $P_c$  を差し引き、出力を求める。

$$P_{\text{los}} = 3r_2 I_2'^2 = 3r_2 \frac{\left(E_2 - \frac{V_2}{s}\right)^2}{Z_2^2} \quad \dots\dots\dots ④$$

$$P_c = 3V_2 \text{Re}(\dot{I}_2') = 3V_2 \frac{r_2}{s} \frac{E_2 - \frac{V_2}{s}}{Z_2^2} \quad \dots\dots\dots ⑤$$

誘導電動機の出(力)  $P_0$  は

$$\begin{aligned} P_0 &= P_{2i} - P_{\text{los}} - P_c = 3 \frac{r_2}{Z_2^2} \left(E_2 - \frac{V_2}{s}\right) \left[ \frac{E_2}{s} - \left(E_2 - \frac{V_2}{s}\right) - \frac{V_2}{s} \right] \\ &= 3 \frac{r_2}{Z_2^2} \left(E_2 - \frac{V_2}{s}\right) \frac{1-s}{s} E_2 \quad \dots\dots\dots ⑥ \end{aligned}$$

同期ワットで表した電動機のトルク  $T$  は⑥式を  $1-s$  で除して

$$T = \frac{P_o}{1-s} = 3 \frac{r_2}{s} \left( E_2 - \frac{V_2}{s} \right) \frac{E_2}{Z_2^2} \quad [\text{W}] \quad \dots\dots\dots ⑦$$

となり、⑦式のトルクが③式の二次入力と一致する。

(3) 題意よりトルクは  $T = \frac{T_0}{3}$  の関係があるから①及び⑦式から

$$3 \frac{r_2}{s_0} \left( E_2 - \frac{V_2}{s_0} \right) \frac{E_2}{Z_2^2} = \frac{1}{3} 3 \frac{r_2}{s_0} \frac{E_2^2}{\left( \frac{r_2}{s_0} \right)^2 + x_2^2} \quad \dots\dots\dots ⑧$$

⑧式の左辺  $Z_2^2$  と右辺の分母は同じ滑り  $s_0$  の二次インピーダンスを 2 乗したものであるから、両者は等しい。したがって

$$E_2 - \frac{V_2}{s_0} = \frac{1}{3} E_2 \quad \dots\dots\dots ⑨$$

回転子巻線 1 相の誘導起電力は  $s_0 E_2$  であり、求める比は  $\frac{V_2}{s_0 E_2}$  であるから⑨式の両辺を  $E_2$  で除して

$$1 - \frac{V_2}{s_0 E_2} = \frac{1}{3} \Rightarrow \frac{V_2}{s_0 E_2} = 1 - \frac{1}{3} = \frac{2}{3} = 0.66666 \rightarrow 0.667$$

となる。

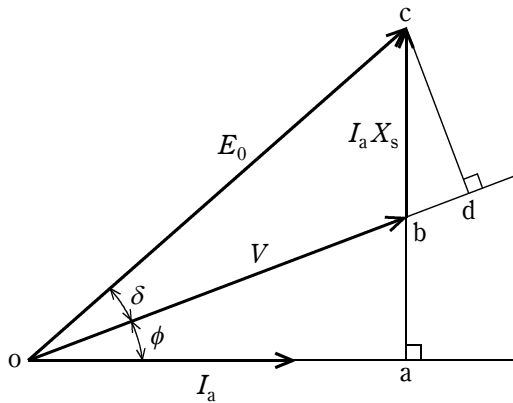


[問2の標準解答]

端子電圧  $V$  で負荷状態の場合と同じ界磁電流における無負荷状態での端子電圧は、誘導起電力  $E_0$  となる。

(1) 電圧変動率  $= \frac{E_0 - V}{V} \times 100$  [%]

(2)



上のベクトル図から、

$$\overline{cd} = E_0 \sin \delta = I_a X_s \cos \phi \quad \text{となる。したがって、}$$

$$I_a X_s = E_0 \cdot \frac{\sin \delta}{\cos \phi} \quad \text{となる。}$$

$$\overline{od} = E_0 \cos \delta = V + I_a X_s \sin \phi \quad \text{から、}$$

$$V = E_0 \cos \delta - I_a X_s \sin \phi = E_0 \cos \delta - E_0 \cdot \frac{\sin \delta}{\cos \phi} \cdot \sin \phi$$

$$= E_0 \left( \cos \delta - \sin \delta \cdot \frac{\sin \phi}{\cos \phi} \right) \quad \text{となる。}$$

(3) 上記(2)で求めた  $I_a X_s$  の式に,

$E_0 = 1.3$  [p.u.],  $X_s = 1.8$  [p.u.],  $\sin \delta = 0.50000$ ,  $\cos \phi = 0.9$  を代入して,

$$I_a \times 1.8 = 1.3 \times \frac{0.50000}{0.9}$$

$$I_a = \frac{1.3}{1.8} \times \frac{0.50000}{0.9} = 0.40123 \rightarrow 0.401 \text{ [p.u.] となる。}$$

上記(2)で求めた  $V$  の式に,

$$E_0 = 1.3 \text{ [p.u.]}, \sin \phi = \sqrt{1 - \cos^2 \phi} = \sqrt{1 - (0.9)^2} = 0.43589, \sin \delta = 0.50000,$$

$$\cos \delta = \frac{\sqrt{3}}{2} = 0.86603 \text{ を代入して,}$$

$$V = 1.3 \times \left( 0.86603 - 0.50000 \times \frac{0.43589}{0.9} \right) = 0.81103 \rightarrow 0.811 \text{ [p.u.] となる。}$$

(4) 単位法で表すと, 発電機出力は  $P = VI_a \cos \phi$  である。また,  $X_s$  を分子及び

分母に入れると,  $P = VI_a \cos \phi = \frac{VI_a X_s \cos \phi}{X_s}$  で表される。

ここで,  $\overline{cd} = I_a X_s \cos \phi = E_0 \sin \delta$  を代入すると,

$$P = \frac{VE_0 \sin \delta}{X_s}$$

(5) 発電機出力  $P = \frac{VE_0 \sin \delta}{X_s} = \frac{0.81103 \times 1.3 \times 0.50000}{1.8} = 0.29287$  [p.u.]

$\Rightarrow P = 0.29287 \times 120000 = 35144 \rightarrow 35100$  [kW] となる。

[問3の標準解答]

- (1) 交流線電流の波形は  $120 [^\circ]$  の方形波であるので、その実効値  $I$  は次式で求まる。

$$I = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_0^{\frac{2\pi}{3}} I_d^2 d\theta} = \sqrt{\frac{2}{3}} I_d$$

- (2) 皮相電力  $S$  は、 $3 \times$  相電圧実効値  $\times$  線電流実効値であるので、次式で求まる。

$$S = 3 \times \frac{V_m}{\sqrt{2} \cdot \sqrt{3}} \times \sqrt{\frac{2}{3}} I_d = V_m I_d$$

- (3) 重なり角のない  $120 [^\circ]$  の方形波電流波形であるので、制御遅れ角が力率角に等しい。したがって、基本波力率  $\cos \varphi_1$  は次式となる。

$$\cos \varphi_1 = \cos \alpha$$

- (4) 有効電力  $P$  は、 $3 \times$  相電圧実効値 (正弦波)  $\times$  線電流基本波実効値  $\times$  基本波力率であり、線電流基本波実効値は  $\frac{\sqrt{6}}{\pi} I_d$  であるので、次式となる。

$$P = 3 \times \frac{V_m}{\sqrt{2} \cdot \sqrt{3}} \times \frac{\sqrt{6}}{\pi} I_d \times \cos \alpha = \frac{3}{\pi} V_m I_d \cos \alpha$$

(別解) 回路の損失は無視しているので、有効電力は直流側で求めてもよい。直流電圧を  $V_d$  とすると、

$$V_d = \frac{3}{\pi} V_m \cos \alpha$$

である。有効電力  $P$  は、直流電圧  $\times$  直流電流であるので、次式となる。

$$P = V_d \cdot I_d = \frac{3}{\pi} V_m \cos \alpha \times I_d = \frac{3}{\pi} V_m I_d \cos \alpha$$

- (5) 総合力率  $\lambda$  は、有効電力  $\div$  皮相電力であるので、次式となる。

$$\lambda = \frac{P}{S} = \frac{\frac{3}{\pi} V_m I_d \cos \alpha}{V_m I_d} = \frac{3}{\pi} \cos \alpha = 0.955 \cos \alpha$$

[問 4 の標準解答]

(1) 伝達関数  $G(s)$  の計算

単位ステップ入力に対する  $G(s)$  のステップ応答は、 $\frac{G(s)}{s}$  を逆ラプラス変換したものである。そこで、単位ステップ応答をラプラス変換すると、

$$\frac{1}{2s^2} - \frac{1}{4s} + \frac{1}{4(s+2)} = \frac{\frac{1}{2}(s+2) - \frac{1}{4}s(s+2) + \frac{1}{4}s^2}{s^2(s+2)} = \frac{1}{s^2(s+2)} \quad \dots \quad \textcircled{1}$$

となり、

$$\frac{G(s)}{s} = \frac{1}{s^2(s+2)} \quad \dots \dots \dots \quad \textcircled{2}$$

の関係より

$$G(s) = \frac{1}{s(s+2)}$$

が得られる。

(2)  $R(s)$  から  $E(s)$  までの伝達関数

まず、マイナーループの伝達関数を求めると

$$\frac{1}{s^2(s+6)} = \frac{1}{s(s^2+6s+2)} \quad \dots \dots \dots \quad \textcircled{3}$$

となる。さらに、③式と図より  $R(s)$  から  $E(s)$  までの伝達関数を求めると

$$\frac{E(s)}{R(s)} = \frac{1}{1 + \frac{K_1 s + K_2}{s(s^2+6s+2)}} = \frac{s(s^2+6s+2)}{s^3+6s^2+(K_1+2)s+K_2} \quad \dots \dots \dots \quad \textcircled{4}$$

(3) 補償器のパラメータと特性根の計算

④式の三次の分母多項式が、特性多項式となる。特性根として、 $-1+j\sqrt{3}$  と  $-1-j\sqrt{3}$  を指定すると、残りの特性根は実根となるので、特性方程式は

$$\begin{aligned}(s+1+j\sqrt{3})(s+1-j\sqrt{3})(s+\alpha) &= 0 \\ \Rightarrow (s^2+2s+4)(s+\alpha) &= 0 \\ \Rightarrow s^3+(\alpha+2)s^2+(2\alpha+4)s+4\alpha &= 0 \quad \dots\dots\dots \text{⑤}\end{aligned}$$

で表される。④式の分母多項式の各係数と⑤式の左辺の各係数とが等しくなるように、 $K_1$ ,  $K_2$ ,  $\alpha$  を求める。各係数の比較より

$$\begin{aligned}6 &= \alpha + 2 \\ K_1 + 2 &= 2\alpha + 4 \\ K_2 &= 4\alpha\end{aligned}$$

が得られ、次式で与えられる結果が得られる。

$$\begin{aligned}K_1 &= 10, K_2 = 16 \\ \alpha &= 4 \quad \text{もう一つの実根は} \quad -4\end{aligned}$$

(4)  $K_1$ ,  $K_2$  の存在領域の計算

ランプ関数の目標値  $r(t) = t$  に対する定常速度偏差を求めると

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{s(s^2+6s+2)}{s^3+6s^2+(K_1+2)s+K_2} \frac{1}{s^2} = \frac{2}{K_2}$$

となり、絶対値の大きさが  $\frac{1}{6}$  以下より、次式が得られる。

$$\frac{2}{K_2} \leq \frac{1}{6} \Rightarrow K_2 \geq 12 \quad \dots\dots\dots \text{⑥}$$

次に、フィードバック制御系が安定となる条件をラウスの判別法より求める。まず、すべての係数が正より、

$$K_1 > -2, K_2 > 0 \quad \dots\dots\dots \text{⑦}$$

が得られる。さらにラウス列を求めると

$$\begin{array}{rcl}
 s^3 & 1 & K_1 + 2 \\
 s^2 & 6 & K_2 \\
 s^1 & \frac{6K_1 + 12 - K_2}{6} & 0 \\
 s^0 & K_2 &
 \end{array}$$

となり，これより

$$K_2 > 0, K_2 < 6K_1 + 12 \quad \dots\dots\dots \textcircled{8}$$

が得られる。なお，安定限界は，次式で与えられる。

$$K_2 = 6K_1 + 12, K_2 = 0$$

ただし， $K_1 = -2$  を除く。

⑦式と⑧式より， $K_1, K_2$  の存在範囲は下図のように与えられる。

