

●平成24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) 給水加熱器 2 において、入口の給水量は $1-m_1$ ，抽気量及びドレン量は m_1 ，出口での給水とドレン合流後の給水量は $m_1+(1-m_1)$ であるから、この給水加熱器 2 の前後のエンタルピー・バランスにより、

$$\begin{aligned} [m_1+(1-m_1)]H_7 &= m_1H_2+(1-m_1)H_6 \\ H_7 &= m_1H_2+H_6-m_1H_6 \\ &= m_1(H_2-H_6)+H_6 \end{aligned}$$

したがって、

$$\text{抽気量 } m_1 = \frac{H_7-H_6}{H_2-H_6} \quad \dots (\text{答})$$

- (2) 給水加熱器 1 において、入口の給水量は $1-m_1-m_2$ ，抽気量及びドレン量は m_2 ，出口での給水とドレン合流後の給水量は $m_2+(1-m_1-m_2)$ であるから、この給水加熱器 1 の前後のエンタルピー・バランスにより、

$$\begin{aligned} [m_2+(1-m_1-m_2)]H_6 &= m_2H_3+(1-m_1-m_2)H_5 \\ H_6-m_1H_6 &= m_2H_3+H_5-m_1H_5-m_2H_5 \\ m_1(H_6-H_5)+m_2(H_3-H_5) &= H_6-H_5 \end{aligned}$$

(1) の結果を利用して

$$\begin{aligned} m_2(H_3-H_5) &= H_6-H_5 - \frac{(H_7-H_6)(H_6-H_5)}{H_2-H_6} \\ m_2 &= \frac{(H_6-H_5)(H_2-H_6)-(H_7-H_6)(H_6-H_5)}{(H_2-H_6)(H_3-H_5)} \\ &= \frac{(H_6-H_5)(H_2-H_6-H_7+H_6)}{(H_2-H_6)(H_3-H_5)} \end{aligned}$$

したがって、

$$\text{抽気量 } m_2 = \frac{(H_6 - H_5)(H_2 - H_7)}{(H_2 - H_6)(H_3 - H_5)} \quad \dots \text{ (答)}$$

- (3) タービン内の第1抽気点～第2抽気点の間について、流量は $1 - m_1$ であり、熱落差は $H_2 - H_3$ であることから、

$$\begin{aligned} W_{12} &= (1 - m_1)(H_2 - H_3) \\ &= \left[1 - \frac{(H_7 - H_6)}{(H_2 - H_6)} \right] (H_2 - H_3) \\ &= \frac{(H_2 - H_7)(H_2 - H_3)}{H_2 - H_6} \quad \dots \text{ (答)} \end{aligned}$$

- (4) タービンでなされる仕事について、上記(3)と同様にしてタービン入口～第1抽気点、第2抽気点～タービン排気点までの仕事 W_{01} 、 W_{23} を求めると、

$$W_{01} = 1(H_1 - H_2)$$

$$W_{23} = (1 - m_1 - m_2)(H_3 - H_4)$$

またボイラにて与えられる熱量 H_{total} は、

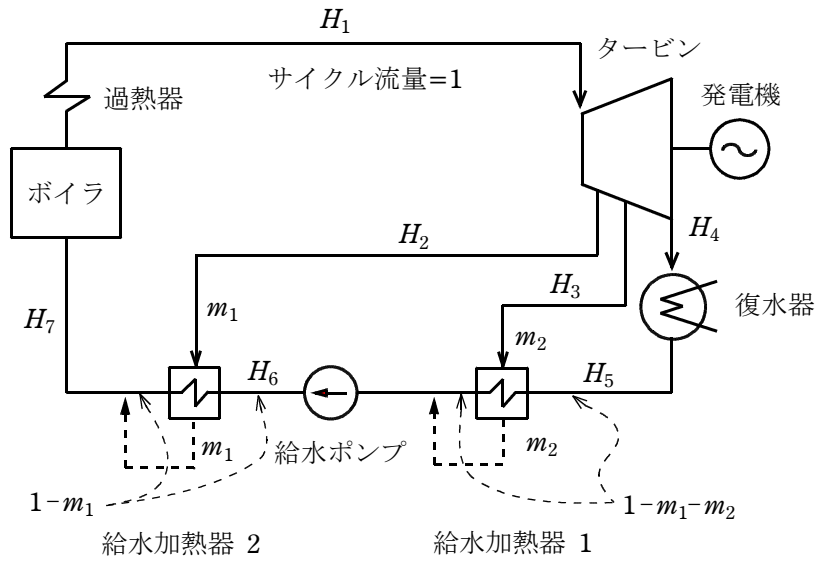
$$H_{\text{total}} = 1(H_1 - H_7)$$

サイクル熱効率 η は、

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{\sum W}{H_{\text{total}}} \\ &= \frac{W_{01} + W_{12} + W_{23}}{H_{\text{total}}} \\ &= \frac{(H_1 - H_2) + (1 - m_1)(H_2 - H_3) + (1 - m_1 - m_2)(H_3 - H_4)}{H_1 - H_7} \\ &= \frac{H_1 - H_2 + H_2 - H_3 - m_1(H_2 - H_3) + H_3 - H_4 - m_1(H_3 - H_4) - m_2(H_3 - H_4)}{H_1 - H_7} \end{aligned}$$

したがって、 $\eta = \frac{(H_1 - H_4) - m_1(H_2 - H_4) - m_2(H_3 - H_4)}{H_1 - H_7} \quad \dots \text{ (答)}$

※なお、(1)～(4)の解答において、上記解答と同等内容の式であれば正解とする。



[問2の標準解答]

- (1) 題意より母線は無限長の直線導体とみなせることから、点 P における磁束密度 B_u は次式で表せる。

$$B_u = \frac{\mu I_u}{2\pi\sqrt{x^2+z^2}} = \frac{4\pi \times 10^{-7}}{2\pi\sqrt{x^2+z^2}} \sqrt{2} I \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \quad [\text{T}]$$

$$= \frac{0.2\sqrt{2} I \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)}{\sqrt{x^2+z^2}} \quad [\mu\text{T}] \quad \dots \textcircled{1}$$

- (2) 電流 I_v , I_w により点 P に生じる磁束密度をそれぞれ B_v [μT], B_w [μT] とすると、 $\textcircled{1}$ 式と同様に次式が成立する。

$$B_v = \frac{0.2\sqrt{2} I \sin \omega t}{\sqrt{(x+d)^2+z^2}} \quad [\mu\text{T}] \quad , \quad B_w = \frac{0.2\sqrt{2} I \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right)}{\sqrt{(x+2d)^2+z^2}} \quad [\mu\text{T}]$$

図に示すように角 θ_u [rad] を定め、磁束密度 B_u の水平方向成分、垂直方向成分をそれぞれ B_{ux} , B_{uz} とすると、

$$B_{ux} = B_u \sin \theta_u = \frac{0.2\sqrt{2} I \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)}{\sqrt{x^2+z^2}} \cdot \frac{z}{\sqrt{x^2+z^2}}$$

$$= \frac{0.2\sqrt{2} I z \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)}{x^2+z^2} \quad [\mu\text{T}]$$

$$B_{uz} = B_u \cos \theta_u = \frac{0.2\sqrt{2} I \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)}{\sqrt{x^2+z^2}} \cdot \frac{x}{\sqrt{x^2+z^2}}$$

$$= \frac{0.2\sqrt{2} I x \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)}{x^2+z^2} \quad [\mu\text{T}]$$

同様に、磁束密度 B_v , B_w の水平方向成分、垂直方向成分を B_{vx} , B_{vz} , B_{wx} , B_{wz} とすると、

$$B_{vx} = \frac{0.2\sqrt{2} I z \sin \omega t}{(x+d)^2+z^2} \quad [\mu\text{T}]$$

$$B_{vz} = \frac{0.2\sqrt{2}I(x+d)\sin\omega t}{(x+d)^2+z^2} \quad [\mu\text{T}]$$

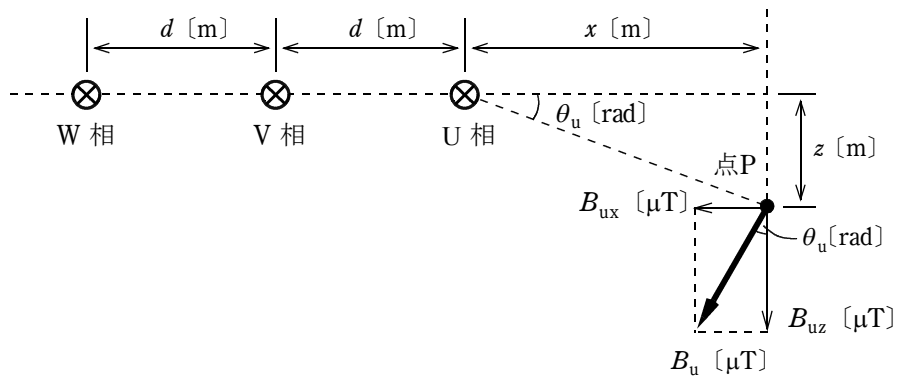
$$B_{wx} = \frac{0.2\sqrt{2}Iz\sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right)}{(x+2d)^2+z^2} \quad [\mu\text{T}]$$

$$B_{wz} = \frac{0.2\sqrt{2}I(x+2d)\sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right)}{(x+2d)^2+z^2} \quad [\mu\text{T}]$$

となる。点 P における磁束密度の合成値 B は B_u , B_v , B_w のベクトル和であるから、

$$B = \sqrt{(B_{ux} + B_{vx} + B_{wx})^2 + (B_{uz} + B_{vz} + B_{wz})^2}$$

$$= 0.2\sqrt{2}I \sqrt{z^2 \left[\frac{\sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)}{x^2+z^2} + \frac{\sin\omega t}{(x+d)^2+z^2} + \frac{\sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right)}{(x+2d)^2+z^2} \right]^2 + \left[\frac{x\sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)}{x^2+z^2} + \frac{(x+d)\sin\omega t}{(x+d)^2+z^2} + \frac{(x+2d)\sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right)}{(x+2d)^2+z^2} \right]^2} \quad [\mu\text{T}]$$



(3) (2)で求めた式より,

$$\lim_{d \rightarrow 0} B = 0.2\sqrt{2}I \sqrt{z^2 \cdot \left[\frac{\sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) + \sin \omega t + \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right)}{x^2 + z^2} \right]^2 + \left\{ x \left[\frac{\sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) + \sin \omega t + \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right)}{x^2 + z^2} \right] \right\}^2} = 0 [\mu\text{T}]$$

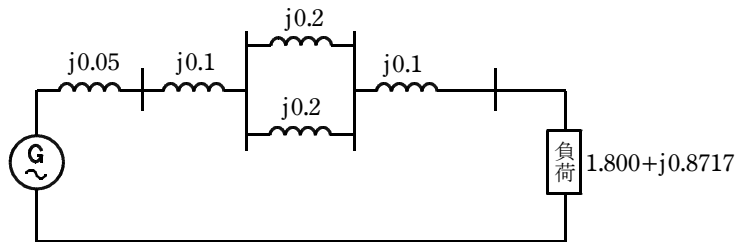
以上より, 母線の間隔 d [m] を小さくすることにより磁束密度の合成値 B [μT] の値は 0 に近づくことが分かる。

(4) 点 P における磁束密度を低減するために以下のような方策が考えられる。

- ・ 母線の設置位置を変更 (水平方向の位置変更又はかさ上げ) することにより, 点 P との間の距離を増す。
- ・ 母線の電線配列を三角配列に変更することにより, 磁界の打ち消し効果を高める。

[問3の標準解答]

- (1) 負荷は電圧 1.0 [p.u.] のとき、皮相電力 0.5 [p.u.] で遅れ力率 0.9 なので、有効電力 $0.5 \times 0.9 = 0.45$ ，無効電力は $0.5 \times \sqrt{1.0 - (0.9)^2} = 0.2179$ で与えられる。このため、負荷端電圧 $1.0 + j0$ [p.u.] とすると、負荷に流れる電流は $0.45 - j0.2179$ [p.u.] で与えられ、負荷インピーダンスは逆数をとって $1.800 + j0.8717$ [p.u.] で表される。これから、単相表現の送電系統は下記の図となる。



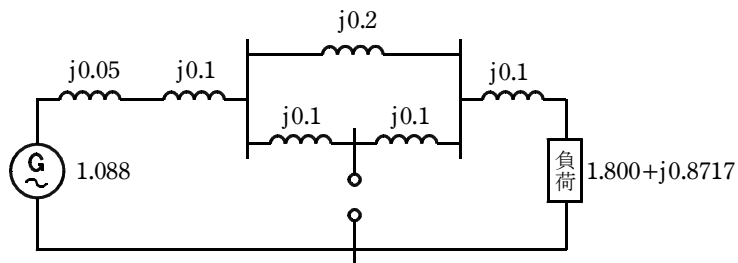
この回路図より、負荷端子電圧を 1.0 [p.u.] に保つために必要な発電機背後電圧 \dot{V}_g は、 $\dot{V}_g = 1.0 + j0.35 \times (0.45 - j0.2179) = 1.0763 + j0.1575$

よって、 $|\dot{V}_g| = 1.088$ [p.u.]

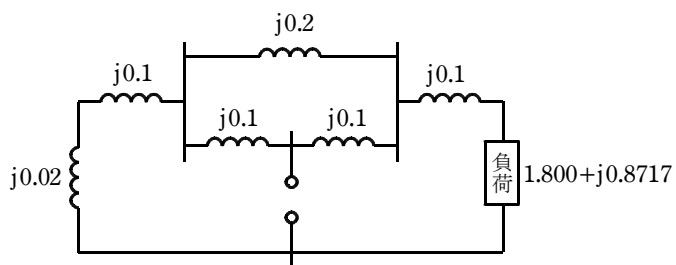
通常運用時は 2 回線送電線に均等に電流が流れるので、事故点の事故前電圧 \dot{V}_{f0} は、 $\dot{V}_{f0} = 1.0 + j0.15 \times (0.45 - j0.2179) = 1.0327 + j0.0675$

よって、 $|\dot{V}_{f0}| = 1.0349 \rightarrow 1.035$ [p.u.]

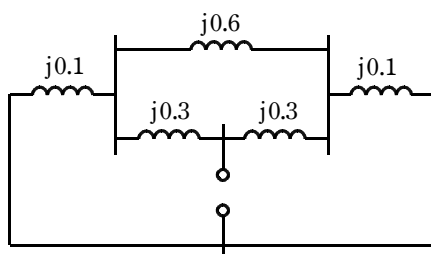
- (2) 問題の送電系統における、正相、逆相、零相回路は次のように書ける。



(a) 正相回路

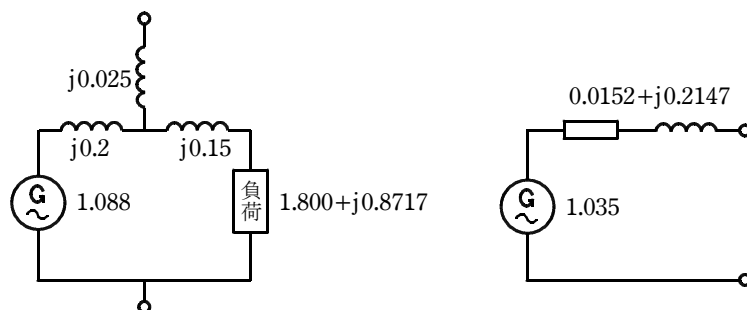
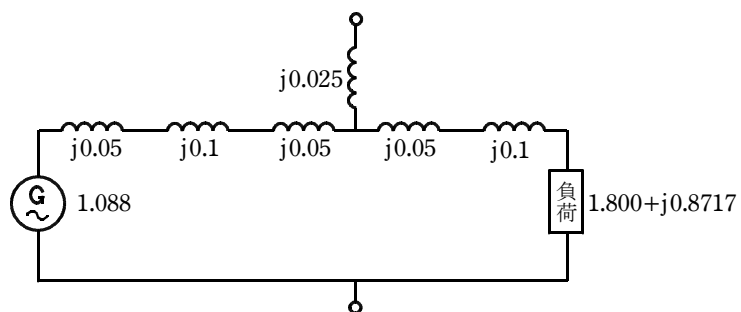


(b) 逆相回路

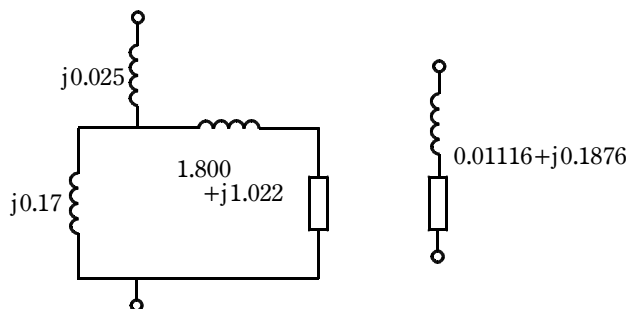
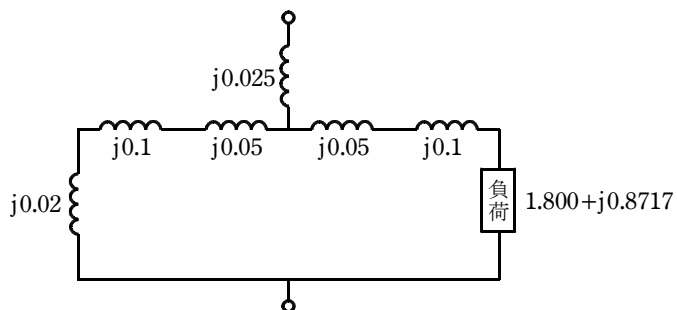


(c) 零相回路

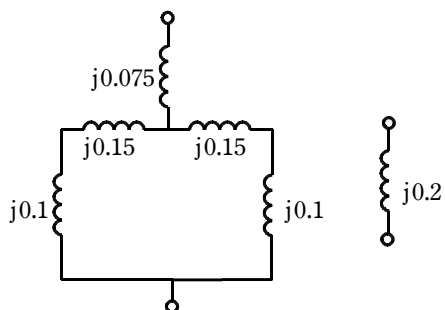
(3) (2) で求めた、正相、逆相、零相回路は次のように簡略化できる。



(a) 正相回路



(b) 逆相回路



(c) 零相回路

(4) a 相での一線地絡事故を考えると、地絡インピーダンスを 0 とするため、

地絡点におけるそれぞれの相の電圧と電流は $\begin{cases} \dot{V}_a = 0 \\ \dot{I}_b = \dot{I}_c = 0 \end{cases}$ とおける。

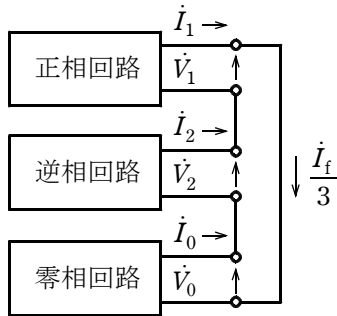
$\dot{V}_0, \dot{V}_1, \dot{V}_2$ をそれぞれ零相, 正相, 逆相電圧, $\dot{I}_0, \dot{I}_1, \dot{I}_2$ をそれぞれ零相, 正相, 逆相電流とすると,

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_0 \\ \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} \dot{V}_a \\ \dot{V}_b \\ \dot{V}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{V}_0 \\ \dot{V}_1 \\ \dot{V}_2 \end{bmatrix}$$

$$\left(\alpha = 1 \angle \frac{2}{3} \pi = -\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \right)$$

より, $\begin{cases} \dot{V}_a = \dot{V}_0 + \dot{V}_1 + \dot{V}_2 = 0 \\ \dot{I}_0 = \dot{I}_1 = \dot{I}_2 = \frac{1}{3} \dot{I}_a \end{cases}$ を得る。

対称座標法における, この条件を満たす回路構成は零相, 正相, 逆相回路を直列に接続した図となる。



(5) (3), (4)の結果より a 相一線地絡事故の地絡電流 \dot{I}_f [kA] は次式で表される。

$$\dot{I}_f = \frac{3 \times 1.035}{(0.0152 + 0.0112) + j(0.2147 + 0.1876 + 0.2)} = 0.2255 - j5.1454 \text{ [p.u.]}$$

よって, $|\dot{I}_f| = 5.1503$ [p.u.] となる。

基準電流 I_S は $I_S = \frac{1000}{\sqrt{3} \times 500} = 1.1547$ [kA] で与えられるので,

地絡電流 $|\dot{I}_f|$ は

$$1.155 \times 5.150 = 5.9483 \rightarrow 5.95 \text{ [kA]}$$

[問4の標準解答]

(1) a. 共通配慮事項

工場で試験を終えた変電機器は、必要に応じて輸送のための分解、梱包を行ってから、現地へ輸送される。そして現地ではこれらの分解された機器を組み立て、絶縁媒体の封入を行い、正規状態となる。大容量変電機器の設計に際して、輸送においては、輸送単位が機器一体輸送、又は分解数を極小化するように配慮されており、品質向上に役立っている。また、現地据付けにおいては、現地作業の範囲を極小化、単純化し、施工不良の発生を防止するように設計されている。

b. 機器ごとの個別配慮事項

- ① 変圧器では、リードの接続においては、工場製造時に取り付けた羽子板端子構造によるボルト締結として、現地でのリード切断などを行わない構造としていること、冷却部取り付け部の接続では、取り付け部のバルブを本体側のフランジに取り付けたまま、冷却器を取り外せる構造により分解、輸送時の防水、防塵^{じん}効果を高めることが上げられる。
- ② GIS では、通電部の通電接触子を用い、導体部に、はめあい構造、ボルト締結といった簡易な接続方式を採用し、複雑な作業を伴わず、確実な接続ができるように配慮されている。一方、タンク接続においては、フランジ部の防水構造化、吸着剤取り付けによる防湿対策がなされている。また金属異物の発生しにくいのはめ合い構造による異物対策がなされている場合もある。

(2) a. 大容量変圧器

- ① 作業環境：タンク内に塵埃^{じんあい}や異物が混入しないために周囲に隔壁や蓋いを設置するなどの防塵措置を施すと共に、作業場周辺に散水を行うなどの作業環境を整備し、場合により粉塵計を使用して防塵管理を行う。
- ② 吸湿防止：タンク内作業時における絶縁物の吸湿を防止するために、絶縁物の露出時間を管理すると共に、作業に使用する乾燥空気の湿度とタンクの内部湿度を管理する。現地作業中に吸湿した水分を熱湯噴

霧循環により乾燥させ、絶縁物表面部分の水分量を基準値以下にする。
高真空下（0.1 から 3 [Torr]）で脱気装置を通して脱気ろ過した絶縁油を注油する。

- ③ 異物混入防止：真空脱気注油後、さらに絶縁油中の微小な塵埃を除去し、脱気度を向上させるために、タンク内の絶縁油を真空脱気装置を通して脱気ろ過循環する。

b. 大容量 GIS

- ① 作業環境：現地接続部の組み立て後の品質は、作業環境の影響を受けやすい。雨天時の作業を回避すると共に、湿度、風速及び塵埃を基準値以下に確保する必要がある。（湿度 80 [%] 以下、風速 5 [m/s] 以下、塵埃は 20 [カウント/min] 以下）
- ② 吸湿防止：組み立て中では、所定の防水処理を行い、吸着剤の放置時間は 30 分以内とする。
- ③ 異物混入防止：作業中はフランジ面への保護カバー取り付けや、Oリングの傷、異物のないことの確認に留意し、防塵フェンスや防塵ハウスを適用し、防塵に配慮して接続作業を行う。ガス処理を行う前に導体接続部の目視確認を行い、真空掃除機などを用いて、タンク内部を清掃後、吸着剤を取り付ける。

[問5の標準解答]

(1) 直流連系の一般的な長所及び短所は、次のとおりである。

(a)長所

- ① ケーブルで送電する場合、充電電流に起因した無効電力発生がないので、そのための無効電力補償装置が不要である。
- ② 交流系統の短絡容量が連系によって増大しない。
- ③ 潮流を自由に、かつ高速に制御できる。
- ④ 送電端と受電端との間の電圧位相差に起因する安定度問題がないので、長距離大容量送電による連系が可能である。
- ⑤ 交流系統の事故が他の交流系統に波及しない。
- ⑥ 交流連系と比べて送電線条数が少なく済むので、送電線の支持物を小形にできる。
- ⑦ 周波数の異なる系統を連系することができる。

(b)短所

- ① 直流連系の両端に変換設備が必要である。
 - ② 交流系統の短絡容量が小さい場合、電圧不安定問題、発電機軸ねじり（ねじれも可）問題、及び高調波不安定現象を発生する可能性がある。
 - ③ 多端子連系の場合は、制御と保護とが複雑になる。
 - ④ 高調波対策が必要である。
- (2) 同じ系統周波数の電力系統間の直流連系は、以下の三つであり、採用するに至った最大の技術的理由は、それぞれの連系ごとに下記のとおりである。

① 北海道-本州間直流連系

採用するに至った最大の技術的理由は、海底ケーブルによる海峡横断送電であるため、交流連系での無効電力発生を回避できること。

② 南福光直流連系

採用するに至った最大の技術的理由は、ループ系統での潮流制御の自由度確保

③ 紀伊水道直流連系

採用するに至った最大の技術的理由は、海底ケーブルによる海峡横断送電であるため、交流連系での無効電力発生を回避できること。

[問 6 の標準解答]

(1) 図 2 より,

$$F(L) = 1 - \frac{1}{80}(L - 20) \quad ; 20 \leq L \leq 100$$

であり, 負荷は 20 ~ 100 [MW] の範囲で変動するが, 負荷電力が 80 [MW] を超えるとき電力不足となるので,

$$\text{LOLP}_{\text{単独}} = F(80) = 0.250$$

(2) 発電機が運転しているとき (確率 0.98) は負荷電力が 80 [MW] を超えるとき, 発電機が停止しているとき (確率 0.02) は負荷電力に関わらず電力不足となるので,

$$\begin{aligned} \text{LOLP}_{\text{単独}} &= 0.98 \times F(80) + 0.02 \times 1.0 \\ &= 0.98 \times 0.25 + 0.02 \times 1.0 \\ &= 0.265 \end{aligned}$$

(3) 発電機 B の余力電力 R_B [MW] は, 負荷 B の負荷電力を L_B [MW] とすると, $R_B = 80 - L_B$ であり, 負荷 A の負荷電力が, 発電機 A の出力 80 [MW] と融通可能電力の合計を超えるとき電力不足となるが, L_B の範囲に応じて 3 とおりに分けられる。

なお, 確率密度関数 $f(L)$ は

$$f(L) = -\frac{dF}{dL} = \frac{1}{80} \quad ; 20 \leq L \leq 100$$

である。

① $20 < L_B \leq 70$ のとき, $10 \leq R_B < 60$ であり, 融通可能電力は 10 [MW]

となるので, $L_A > 80 + 10 = 90$ のとき電力不足となる。よって,

$$F(90) \times \int_{20}^{70} f(L_B) dL_B = 0.125 \times \frac{1}{80} \times 50 = 0.078125$$

② $70 < L_B \leq 80$ のとき, $0 \leq R_B < 10$ であり, 融通可能電力は R_B となる

るので, $L_A > 80 + R_B = 160 - L_B$ のとき電力不足となる。よって,

$$\begin{aligned} \int_{70}^{80} F(160 - L_B) f(L_B) dL_B &= \int_{70}^{80} \left[1 - \frac{1}{80}(140 - L_B) \right] \frac{1}{80} dL_B \\ &= \left(\frac{1}{80} \right)^2 \int_{70}^{80} (L_B - 60) dL_B = \left(\frac{1}{80} \right)^2 \times \left[\frac{1}{2}(80^2 - 70^2) - 60 \times 10 \right] = 0.0234375 \end{aligned}$$

- ③ $80 < L_B \leq 100$ のとき、 $R_B < 0$ であり、融通可能電力は 0 [MW] となるので、 $L_A > 80$ のとき電力不足となる。よって、

$$F(80) \times \int_{80}^{100} f(L_B) dL_B = 0.25 \times \int_{80}^{100} \frac{1}{80} dL_B = 0.0625$$

以上により、連系時の電力不足確率は、①から③を合計して、

$$\text{LOLP}_{\text{連系}} = 0.1640625 \rightarrow 0.164$$

[別解]

- (3) 負荷 A の負荷電力を L_A [MW] とすると、 L_A の範囲に応じて 3 とおりに分けられる。

- ① $20 < L_A \leq 80$ のとき、電力不足とならない。
 ② $80 < L_A \leq 90$ のとき、不足電力は $L_A - 80$ なので、

$$L_A - 80 > R_B = 80 - L_B \quad \text{すなわち、}$$

$$L_B > 160 - L_A \quad \text{のとき電力不足となる。よって、}$$

$$\begin{aligned} \int_{80}^{90} F(160 - L_A) f(L_A) dL_A &= \int_{80}^{90} \left[1 - \frac{1}{80}(140 - L_A) \right] \frac{1}{80} dL_A \\ &= \left(\frac{1}{80} \right)^2 \int_{80}^{90} (L_A - 60) dL_A = \left(\frac{1}{80} \right)^2 \times \left[\frac{1}{2}(90^2 - 80^2) - 60 \times 10 \right] = 0.0390625 \end{aligned}$$

- ③ $90 < L_A \leq 100$ のとき、送電容量は 10 [MW] なので、発電機 B の余力電力に関わらず電力不足となる。よって、

$$\int_{90}^{100} f(L_A) dL_A = F(90) - F(100) = 0.125$$

以上により、連系時の電力不足確率は、①から③を合計して、

$$\text{LOLP}_{\text{連系}} = 0.1640625 \rightarrow 0.164$$

<機械・制御科目>

[問 1 の標準解答]

- (1) 電動機の回転速度を N [min^{-1}], 同期速度を N_0 [min^{-1}] とすると, 次式が成立する。

$$N = nN_0 = (1-s)N_0 \quad [\text{min}^{-1}]$$

したがって,

$$n = 1 - s$$

となる。次に, 滑り s における単位法で表した出力 P は, 二次入力を P_{2i} とすると

$$P = (1-s)P_{2i} \quad [\text{p.u.}]$$

となる。題意から, 単位法で表したトルク T は, 単位法で表した二次入力 P_{2i} に等しいから

$$T = P_{2i} = \frac{P}{1-s} \quad [\text{p.u.}]$$

となる。

(2)

- a. 出力 P_1 が 0.6 [p.u.] のときのトルク T_1 は, 滑りが s_1 であるから

$$T_1 = \frac{0.6}{1-s_1} = \frac{0.6}{0.9} = \frac{2}{3} = 0.66666 \rightarrow 0.667 \quad [\text{p.u.}]$$

- b. 出力が P_2 [p.u.] のときのトルクが T_2 , 滑りが s_2 であるから, 次式が成立する。

$$T_2 - T_1 = [k_0 + k_1(1-s_2)^2] - [k_0 + k_1(1-s_1)^2] = k_1[(1-s_2)^2 - (1-s_1)^2] \quad \cdots \quad \textcircled{1}$$

c. $T_2 = \frac{P_2}{1-s_2}$ であるから、①式に代入すると

$$k_1(1-s_2)^3 + [T_1 - k_1(1-s_1)^2](1-s_2) = P_2 \quad \dots\dots\dots ②$$

ここで、 $A = T_1 - k_1(1-s_1)^2$ とし、また、題意から $(1-s_2)^3 \doteq 1-3s_2$ とすると

$$s_2 = \frac{A+k_1-P_2}{3k_1+A}$$

となる。ここで、

$$A = T_1 - k_1(1-s_1)^2 = 0.66666 - 1.64 \times 0.9^2 = -0.66174$$

であるから

$$s_2 = \frac{-0.66174 + 1.64 - 0.85}{3 \times 1.64 - 0.66174} = 0.030120 \rightarrow 0.0301$$

$$T_2 = \frac{P_2}{1-s_2} = \frac{0.85}{0.96988} = 0.87639 \rightarrow 0.876 \text{ [p.u.]}$$

(3) 上記(2)の結果から $s_1 > s_2$ 及び $T_1 < T_2$ であるので $r_{22} < r_{21}$ である。また、題意からトルクと滑りとの関係は直線で表されるので、図のようになる。横軸は滑り、縦軸はトルクである。

図の A, B 点は比例推移するので

$$\frac{r_{21}}{s_1} = \frac{r_{22}}{s_3} \rightarrow \frac{r_{21}}{r_{22}} = \frac{s_1}{s_3} \quad \dots\dots\dots ③$$

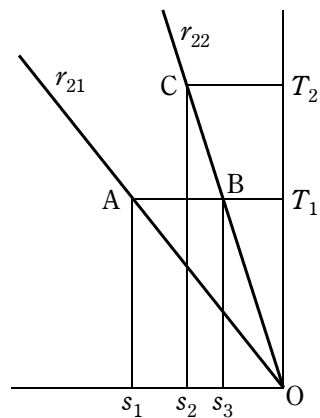
ただし、 s_3 は B 点における滑りである。

また、B, C 点では $\triangle OCs_2$ と $\triangle OBs_3$ は相似であるから

$$\frac{T_1}{s_3} = \frac{T_2}{s_2} \rightarrow \frac{s_2}{s_3} = \frac{T_2}{T_1} \quad \dots\dots\dots ④$$

③と④式から

$$\frac{r_{21}}{r_{22}} = \frac{s_1}{s_2} \cdot \frac{T_2}{T_1} = \frac{0.1}{0.03012} \cdot \frac{0.87639}{0.66666} = 4.36454 \rightarrow 4.36 \text{ 倍}$$



<参考>誘導電動機における単位法の考え方

基準電圧 $V_B = V_n$ (定格(線間)電圧) [V], 基準電流 $I_B = I_n$ (定格電流) [A]
 とすると

$$\text{基準容量 } S_B = \sqrt{3}V_B I_B \text{ [V}\cdot\text{A]} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\text{基準インピーダンス } Z_B = \frac{V_B}{\sqrt{3}I_B} = \frac{V_B^2}{S_B} \text{ [\Omega]} \quad \dots\dots\dots (2)$$

誘導電動機は簡易等価回路とし、出力、トルク、二次入力を計算する。電圧は定格電圧とする。ただし、用いる等価回路定数の記号は以下のとおり。

r_1 : 一次抵抗 [Ω], x_1 : 一次漏れリアクタンス [Ω]

r_2 : 二次抵抗(一次換算値) [Ω], x_2 : 二次漏れリアクタンス(一次換算値) [Ω]

$$\text{二次電流 } I_2 = \frac{\frac{V_B}{\sqrt{3}}}{\sqrt{\left(r_1 + \frac{r_2}{s}\right)^2 + x^2}} \text{ [A]}$$

ただし、 $x = x_1 + x_2$ であり、 s は滑りである。

$$\text{出力 } P = 3 \frac{1-s}{s} r_2 I_2^2 \text{ [W]}$$

$$\text{トルク } T = \frac{3}{\omega_0} \cdot \frac{1}{s} r_2 I_2^2 \text{ [N}\cdot\text{m]}$$

ただし、 ω_0 : 同期角速度 [rad/s]

$$\text{二次入力 } P_2 = 3 \frac{1}{s} r_2 I_2^2 \text{ [W]} \text{ (同期ワットで表したトルク)}$$

これらを単位法で表す。

$$\begin{aligned} I_{2\text{pu}} &= \frac{I_2}{I_B} = \frac{1}{I_B} \cdot \frac{\frac{V_B}{\sqrt{3}}}{\sqrt{\left(r_1 + \frac{r_2}{s}\right)^2 + x^2}} = \frac{Z_B}{\sqrt{\left(r_1 + \frac{r_2}{s}\right)^2 + x^2}} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{r_1 + \frac{r_2}{s}}{Z_B}\right)^2 + \left(\frac{x}{Z_B}\right)^2}} \\ &= \frac{1}{\sqrt{\left(r_{1\text{pu}} + \frac{r_{2\text{pu}}}{s}\right)^2 + x_{\text{pu}}^2}} \text{ [p.u.]} \end{aligned}$$

ただし、添字 pu は単位法で表した諸量である。

$$\text{出力 } P_{\text{pu}} = \frac{P}{S_B} = \frac{1}{3Z_B I_B^2} 3 \frac{1-s}{s} r_2 I_2^2 = \frac{1-s}{s} \frac{r_2}{Z_B} \frac{I_2^2}{I_B^2} = \frac{1-s}{s} r_{2\text{pu}} I_{2\text{pu}}^2 \quad [\text{p.u.}]$$

ただし、(1)、(2)式から $S_B = 3Z_B I_B^2$ とした。

$$\text{二次入力 } P_{2\text{pu}} = \frac{P_2}{S_B} = \frac{1}{3Z_B I_B^2} 3 \frac{1}{s} r_2 I_2^2 = \frac{1}{s} \frac{r_2}{Z_B} \frac{I_2^2}{I_B^2} = \frac{1}{s} r_{2\text{pu}} I_{2\text{pu}}^2 \quad [\text{p.u.}]$$

基準トルク T_B [N・m] は二次入力 $P_{2\text{pu}}$ と等しくなるように選ばなくてはならない。

$$T_{\text{pu}} = \frac{T}{T_B} = \frac{1}{T_B} \frac{3}{\omega_0} \frac{r_2}{s} I_2^2$$

これと $P_{2\text{pu}}$ の式が等しい。

$$\frac{1}{T_B} \frac{3}{\omega_0} \frac{r_2}{s} I_2^2 = \frac{1}{s} \frac{r_2}{Z_B} \frac{I_2^2}{I_B^2} \rightarrow T_B \omega_0 = 3Z_B I_B^2 = S_B$$

となるので基準トルク T_B は

$$T_B = \frac{S_B}{\omega_0}$$

である。 T_B は S_B の単位を [W] と見なせば [N・m] となる。つまり、回転速度が同期速度で、定格容量に相当する出力のときのトルクといえる。

単位法におけるトルクと出力の関係は

$$T_{\text{pu}} = P_{2\text{pu}} = \frac{P_{\text{pu}}}{1-s}$$

となる。

[問2の標準解答]

(1) 無負荷電圧の位相を位相の基準として無負荷電圧を実数で表し $V_N = 100$ [%] とする。

負荷は、インピーダンスの大きさが 100 [%] で力率が 0.8 であることから、負荷の抵抗は $R_L = 80$ [%]、リアクタンスは $X_L = 60$ [%] である。

変圧器のインピーダンスを加えると全抵抗は $R = 80.5$ [%]、全リアクタンスは $X = 70$ [%]、全インピーダンスは $Z = \sqrt{R^2 + X^2} = 106.68$ [%] となる。

これから、負荷に流れる電流 I_L は、次式となる。

$$I_L = \frac{V_N}{R + jX} \times 100$$

また、負荷に加わる電圧 V_L は、次式となる。

$$V_L = \frac{(R_L + jX_L)I_L}{100} = (R_L + jX_L) \frac{V_N}{R + jX}$$

絶対値をとる。負荷のインピーダンスの大きさは 100 [%] であることを考慮して

$$V_L = 100 \times \frac{V_N}{Z} = 100 \times \frac{100}{106.68} = 93.740 \text{ [%]}$$

電圧変動率は、次の式で求められる。

$$\varepsilon = \frac{V_N - V_L}{V_N} \times 100 = 100 - 93.740 = 6.260 \rightarrow 6.26 \text{ [%]}$$

(2) 問題で与えられたフェーザ図を用いて検討する。 V_N の実数分及び虚数分に対して次の式が成り立つ。

$$V_N \cos \theta = V_L + \frac{p}{100} I_L \cos \phi + \frac{q}{100} I_L \sin \phi \quad \dots\dots\dots ①$$

$$V_N \sin \theta = -\frac{p}{100} I_L \sin \phi + \frac{q}{100} I_L \cos \phi \quad \dots\dots\dots ②$$

$\cos \theta = \sqrt{1 - \sin^2 \theta}$ の関係を用いて式②から

$$V_N \cos \theta = V_N \sqrt{1 - \left[\frac{1}{V_N} \left(\frac{q}{100} I_L \cos \phi - \frac{p}{100} I_L \sin \phi \right) \right]^2}$$

この式を式①に代入して

$$V_L = -\left(\frac{p}{100} I_L \cos \phi + \frac{q}{100} I_L \sin \phi \right) + V_N \sqrt{1 - \left[\frac{1}{V_N} \left(\frac{q}{100} I_L \cos \phi - \frac{p}{100} I_L \sin \phi \right) \right]^2}$$

電圧変動率の算出式に代入して、また、 $V_N = 100$ [%] であることを考慮して

$$\varepsilon = 100 + \left(\frac{p}{100} I_L \cos \phi + \frac{q}{100} I_L \sin \phi \right) - 100 \sqrt{1 - \left[\frac{1}{100} \left(\frac{q}{100} I_L \cos \phi - \frac{p}{100} I_L \sin \phi \right) \right]^2}$$

(3) 平方根の部分に与えられた近似式を用いると

$$\begin{aligned} \varepsilon &\doteq 100 + \left(\frac{p}{100} I_L \cos \phi + \frac{q}{100} I_L \sin \phi \right) - 100 \left[1 - \frac{\left(\frac{q}{100} I_L \cos \phi - \frac{p}{100} I_L \sin \phi \right)^2}{2 \times 100^2} \right] \\ &= \left(\frac{p}{100} I_L \cos \phi + \frac{q}{100} I_L \sin \phi \right) + \frac{\left(\frac{q}{100} I_L \cos \phi - \frac{p}{100} I_L \sin \phi \right)^2}{200} \end{aligned}$$

[問3の標準解答]

(1) 信号波が三角波よりも大きければ上アームの IGBT をオンさせ、下アームの IGBT をオフさせる。反対に、信号波が三角波よりも小さければ上アームの IGBT をオフさせ、下アームの IGBT をオンさせる。

(2) 変調率 $A_1 = 1$ の相電圧波高値は直流電圧 $\frac{E_d}{2}$ となる。したがって、変調率 A_1 の u 相基本波電圧 v_{uf1} は次式で表される。

$$v_{uf1} = \frac{A_1 E_d}{2} \sin \omega t$$

また、v 相基本波電圧 v_{vf1} 、w 相基本波電圧 v_{wf1} は対称三相電圧であるので次式となる。

$$v_{vf1} = \frac{A_1 E_d}{2} \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$v_{wf1} = \frac{A_1 E_d}{2} \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right)$$

(3) $A_1 = 1$ のとき、u 相基本波電圧 v_{uvf1} の波高値は最大電圧 $\frac{E_d}{2}$ となるので、相電圧波高値を $\sqrt{2}$ で除して相電圧実効値を得て、さらに $\sqrt{3}$ 倍して次式の線間電圧実効値 V_{uvf1} を得る。

$$V_{uvf1} = \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} E_d = 0.61237 E_d \rightarrow 0.612 E_d$$

(4) 図3から、位相 $\omega t = \frac{\pi}{3}, \frac{2\pi}{3}, \frac{4\pi}{3}, \frac{5\pi}{3}$ で波高値を示し、そのときの信号波における波高値は ωt にそれぞれの値を代入することにより、 $\frac{\sqrt{3}}{2}, \frac{\sqrt{3}}{2}, -\frac{\sqrt{3}}{2}, -\frac{\sqrt{3}}{2}$ となる。

したがって、分母の三角波波高値は大きさ1で変わらないので、変調率 A_2 は次式となる。

$$A_2 = \frac{\frac{\sqrt{3}}{2}}{1} = \frac{\sqrt{3}}{2} = 0.86602 \rightarrow 0.866$$

(5) PWM 制御方式2における $A_2 = 1$ にしたときの V_{uvf2} は、変調率が $\frac{2}{\sqrt{3}}$ 倍となるので、 V_{uvf1} に対しても $\frac{2}{\sqrt{3}} = 1.1547 \rightarrow 1.15$ 倍となる。

[問 4 の標準解答]

(1) $R(s)$ から $Y_R(s)$ までの伝達関数の計算

図の上部のフィードバック系において

$$Y_R(s) = G_M(s)K_A(s)[R(s) - Y_R(s)]$$

が成り立つので、これより、 $R(s)$ から $Y_R(s)$ までの伝達関数を求めると

$$Y_R(s) = \frac{G_M(s)K_A(s)}{1 + G_M(s)K_A(s)} R(s) \quad \dots\dots\dots \textcircled{1}$$

となり、求める伝達関数は次式で与えられる。

$$\frac{G_M(s)K_A(s)}{1 + G_M(s)K_A(s)}$$

(2) $R(s)$ から $E(s)$ までの伝達関数の計算

図から、上記(1)と同様に

$$U_R(s) = \frac{K_A(s)}{1 + G_M(s)K_A(s)} R(s) \quad \dots\dots\dots \textcircled{2}$$

さらに、

$$E(s) = Y_R(s) - Y(s) \quad \dots\dots\dots \textcircled{3}$$

$$Y(s) = G(s)[U_R(s) + K_B(s)E(s)] \quad \dots\dots\dots \textcircled{4}$$

が成り立つ。④式を③式へ代入すると

$$E(s) = Y_R(s) - G(s)[U_R(s) + K_B(s)E(s)]$$

となり

$$E(s) = \frac{1}{1 + G(s)K_B(s)} [Y_R(s) - G(s)U_R(s)]$$

が得られる。この式へ①式と②式を代入すると

$$E(s) = \frac{K_A(s)[G_M(s) - G(s)]}{[1 + G(s)K_B(s)][1 + G_M(s)K_A(s)]} R(s) \quad \dots\dots\dots \textcircled{5}$$

となり、求める答は次式となる。

$$\frac{K_A(s)[G_M(s) - G(s)]}{[1 + G(s)K_B(s)][1 + G_M(s)K_A(s)]}$$

(3)

a. 特性方程式

与えられたそれぞれの伝達関数を①式に代入すると、特性方程式は

$$1 + \frac{1}{J_M s^2} (K_1 + K_2 s) = 0 \Rightarrow J_M s^2 + K_2 s + K_1 = 0$$

となる。2次方程式のすべての係数が正なので、実部が負の根をもつことから安定となる。あるいは、ラウスの安定判別法を用いると

$$\begin{array}{r} s^2 \\ s^1 \\ s^0 \end{array} \quad \begin{array}{r} J_M \\ K_2 \\ K_1 \end{array} \quad \begin{array}{r} K_1 \\ \\ \end{array}$$

となり、仮定より $K_1 > 0, K_2 > 0, J_M > 0$ なので安定であることがいえる。

このとき、 $s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2 = 0$ との対応から

$$\zeta = \frac{K_2}{2\sqrt{K_1 J_M}}, \quad \omega_n = \sqrt{\frac{K_1}{J_M}}$$

が得られる。

b. 安定条件

図の制御系が安定となるためには、すでに上部のフィードバックループの安定性が保証されているので、⑤式から、

$$1 + G(s)K_P(s) = 0$$

の特性根がすべて左半面に存在すればよい。特性方程式は

$$J s^3 + K_4 s^2 + K_3 s + K_5 = 0$$

となる。各係数は、すべて正である。次にラウス表を作ると以下のようになる。

$$\begin{array}{r} s^3 \\ s^2 \\ s^1 \\ s^0 \end{array} \quad \begin{array}{r} J \\ K_4 \\ \frac{K_3 K_4 - J K_5}{K_4} \\ K_5 \end{array} \quad \begin{array}{r} K_3 \\ K_5 \\ 0 \\ \end{array}$$

これより、安定条件は次式で与えられる。

$$K_3 K_4 > J K_5$$

c. 定常速度偏差の計算

偏差 $E(s)$ を計算すると

$$\begin{aligned}
 E(s) &= \frac{(K_1 + K_2s) \left(\frac{1}{J_M s^2} - \frac{1}{J s^2} \right)}{\frac{J_M s^2 + K_2s + K_1}{J_M s^2} \cdot \frac{J s^3 + K_4 s^2 + K_3s + K_5}{J s^3}} R(s) \\
 &= \frac{s^3(K_1 + K_2s)(J - J_M)}{(J_M s^2 + K_2s + K_1)(J s^3 + K_4 s^2 + K_3s + K_5)} R(s) \quad \dots\dots\dots \textcircled{6}
 \end{aligned}$$

となる。規範目標値 $r(t) = t^n$ のラプラス変換は、 $R(s) = \mathcal{L}\{t^n\} = \frac{n!}{s^{n+1}}$ であるので、⑥式へ代入し、最終値の定理を用いると、定常偏差 e_s は次式で与えられる。

$$\begin{aligned}
 e_s &= \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot E(s) \\
 &= \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot \frac{s^3(K_1 + K_2s)(J - J_M)}{(J_M s^2 + K_2s + K_1)(J s^3 + K_4 s^2 + K_3s + K_5)} \cdot \frac{n!}{s^{n+1}}
 \end{aligned}$$

となるので、上の定常値が有限の値をとるのは、

$$n \leq 3$$

の場合なので、 $n = 3$ が答となる。このときの定常偏差は、

$$e_s = \frac{6(J - J_M)}{K_5}$$

となる。