

令和3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) 運転中の水車(又はポンプ水車)は各部の流速、圧力がそれぞれ異なる。ある点の圧力がそのときの水温における飽和蒸気圧以下に低下すると、その部分の水は蒸発して水蒸気となり、流水中に微細な気泡が発生する。この気泡が周囲の水とともに流れて圧力の高い部分に達すると突然つぶれ、その瞬間に非常に高い圧力が生じる。この現象をキャビテーションという。
- (2) 以下の機器に与える影響から二つ記載されていればよい。
- ①流水に接するランナ羽根に壊食が生じる
 - ②水車効率が低下する
 - ③振動・騒音が発生する
- (3) キャビテーションを抑制するために、設計上、最も重要なのは吸出し高さの選定であり、吸出し高さを低くすることが効果的である。
- これに加えて、プロフィールゲージ等を用いてランナ羽根の形状を適切に整形し、表面を平滑に仕上げることも重要で、水の流れがランナ表面から剥離しないことでのキャビテーションの抑制が期待できる。
- (4) 部分負荷運転の下限値を上げることでキャビテーションの抑制を図る。

[問2の標準解答]

- (1) 送電線の外部事故発生時において、故障電流が大電流になると、CTにも大きな電流が流れるため比例分誤差が大きくなる。特にCTの鉄心飽和に伴い電流値の誤差が大きくなると、端子間に不要な差電流が生じて電流差動リレーが誤動作するおそれがある。対策として、電流差動リレーの比率特性を小電流域特性と大電流域特性の二つの要素から構成し、大電流域において誤差が大きくなったときに動作感度を低下させることにより、誤動作を防止する。
- (2) 変圧器を停止したときに変圧器鉄心に残留磁束が残った状態で、次に変圧器を充電すると、系統電圧の位相によっては大きな励磁突入電流が発生するため差動回路に大きな差電流が発生し、比率差動リレーが誤動作するおそれがある。対策として、励磁突入電流には第二高調波が多く含まれることから、これを検出した場合は差動リレーの抑制量を増やしたり、リレーを短時間ロックすることにより、誤動作を防止する。
- (3) 母線の外部至近端の回線で事故が発生した場合、事故回線のCT一次側に大きな故障電流が流れる。この際、交流電流に過渡直流分が重畳するためCT鉄心に磁気飽和が発生し誤差が生じる。一方、事故回線以外の変流器は飽和せず誤差も生じないため、母線保護リレーが不要な差電流を検出し誤動作するおそれがある。対策として、事故回線のCTの非飽和期間に差電流の無変化を検出した場合は外部事故と判定して、リレーを短時間ロックすることにより、誤動作を防止する。

[問3の標準解答]

(1) $\dot{I}_1 = \dot{I}_{12} + \dot{I}_{13}$, $\dot{I}_2 = \dot{I}_{21} + \dot{I}_{23}$, $\dot{I}_3 = \dot{I}_{31} + \dot{I}_{32}$ より

$$\dot{I}_1 = \frac{\overline{\dot{S}_1}}{\overline{\dot{V}_1}} = \left(\frac{\dot{V}_1 - \dot{V}_2}{jX_{12}} + \frac{\dot{V}_1 - \dot{V}_3}{jX_{13}} \right) = \dot{Y}_{11}\dot{V}_1 + \dot{Y}_{12}\dot{V}_2 + \dot{Y}_{13}\dot{V}_3 \dots\dots\dots \textcircled{1}$$

$$\dot{I}_2 = \frac{\overline{\dot{S}_2}}{\overline{\dot{V}_2}} = \left(\frac{\dot{V}_2 - \dot{V}_1}{jX_{12}} + \frac{\dot{V}_2 - \dot{V}_3}{jX_{23}} \right) = \dot{Y}_{21}\dot{V}_1 + \dot{Y}_{22}\dot{V}_2 + \dot{Y}_{23}\dot{V}_3 \dots\dots\dots \textcircled{2}$$

$$\dot{I}_3 = \frac{\overline{\dot{S}_3}}{\overline{\dot{V}_3}} = \left(\frac{\dot{V}_3 - \dot{V}_1}{jX_{13}} + \frac{\dot{V}_3 - \dot{V}_2}{jX_{23}} \right) = \dot{Y}_{31}\dot{V}_1 + \dot{Y}_{32}\dot{V}_2 + \dot{Y}_{33}\dot{V}_3 \dots\dots\dots \textcircled{3}$$

①式, ②式, ③式から

$$[\dot{Y}_{kl}] = \begin{bmatrix} \dot{Y}_{11} & \dot{Y}_{12} & \dot{Y}_{13} \\ \dot{Y}_{21} & \dot{Y}_{22} & \dot{Y}_{23} \\ \dot{Y}_{31} & \dot{Y}_{32} & \dot{Y}_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{jX_{12}} + \frac{1}{jX_{13}} & -\frac{1}{jX_{12}} & -\frac{1}{jX_{13}} \\ -\frac{1}{jX_{12}} & \frac{1}{jX_{12}} + \frac{1}{jX_{23}} & -\frac{1}{jX_{23}} \\ -\frac{1}{jX_{13}} & -\frac{1}{jX_{23}} & \frac{1}{jX_{13}} + \frac{1}{jX_{23}} \end{bmatrix} \dots\dots \textcircled{4}$$

⋯⋯(答)

(2)

$$[\dot{Y}_{kl}] = \begin{bmatrix} \frac{1}{jX_{12}} + \frac{1}{jX_{13}} + \frac{j\omega C_{12}}{2} + \frac{j\omega C_{13}}{2} & -\frac{1}{jX_{12}} & -\frac{1}{jX_{13}} \\ -\frac{1}{jX_{12}} & \frac{1}{jX_{12}} + \frac{1}{jX_{23}} + \frac{j\omega C_{12}}{2} + \frac{j\omega C_{23}}{2} & -\frac{1}{jX_{23}} \\ -\frac{1}{jX_{13}} & -\frac{1}{jX_{23}} & \frac{1}{jX_{13}} + \frac{1}{jX_{23}} + \frac{j\omega C_{13}}{2} + \frac{j\omega C_{23}}{2} \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} -j10 - j10 + j + j & j10 & j10 \\ j10 & -j10 - j10 + j + j & j10 \\ j10 & j10 & -j10 - j10 + j + j \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} -j18 & j10 & j10 \\ j10 & -j18 & j10 \\ j10 & j10 & -j18 \end{bmatrix} \dots\dots\dots \textcircled{5}$$

⋯⋯(答)

(3)

①式, ②式, ③式から

$$\dot{S}_k = \dot{V}_k \sum_{l=1}^3 \overline{Y_{kl}} \dot{V}_l \dots\dots\dots \textcircled{6}$$

$$P_k + jQ_k = \sum_{l=1}^3 |\dot{V}_k| |\dot{V}_l| [\cos(\theta_k - \theta_l) + j \sin(\theta_k - \theta_l)] (G_{kl} - jB_{kl}) \dots\dots\dots \textcircled{7}$$

$$P_k = \sum_{l=1}^3 |\dot{V}_k| |\dot{V}_l| [G_{kl} \cos(\theta_k - \theta_l) + B_{kl} \sin(\theta_k - \theta_l)] \dots\dots\dots \textcircled{8}$$

\dots (答)

$$Q_k = \sum_{l=1}^3 |\dot{V}_k| |\dot{V}_l| [G_{kl} \sin(\theta_k - \theta_l) - B_{kl} \cos(\theta_k - \theta_l)] \dots\dots\dots \textcircled{9}$$

\dots (答)

(4)

$$P_2 = \sum_{l=1}^3 |\dot{V}_2| |\dot{V}_l| [G_{2l} \cos(\theta_2 - \theta_l) + B_{2l} \sin(\theta_2 - \theta_l)]$$

に与えられた数値を代入して

$$0.7 = 10.5 \sin \theta_2 + 10.5 |\dot{V}_3| \sin(\theta_2 - \theta_3) \dots\dots\dots \textcircled{10}$$

\dots (答)

(5) P_2 の誤差を ΔP_2 として, ⑩式に初期値を代入して

$$\Delta P_2 = 0.7 - 0 = 0.7 \dots\dots (答)$$

[問4の標準解答]

- (1) タップ段数は同じなので1台当たり、 $\frac{280 \text{ MV} \cdot \text{A}}{2 \text{ 台}}$ の送電電力を分担する。1

台の変圧器に流れる2次側電流を i [A]，2次側換算漏れリアクタンスの上流側母線電圧を \dot{V} [V] とすると，題意から次の式が成り立つ。

$$3 \times \frac{\dot{V}}{\sqrt{3}} \times \bar{I} = \frac{280 \text{ MV} \cdot \text{A}}{2 \text{ 台}} \times (0.8 + j\sqrt{1.0 - 0.8^2})$$

1次側は中間タップなので， $\dot{V} = 154 \text{ kV}$ として

$$\bar{I} = \left[\frac{1}{\sqrt{3} \times 154 \times 10^3} \times \frac{280 \times 10^6}{2} \times (0.8 + j\sqrt{1.0 - 0.8^2}) \right]$$

$$\dot{I} = 419.90 - j314.93 \text{ A}$$

$$I_A = I_B = |\dot{I}| = 524.88 \approx 525 \text{ A} \cdots (\text{答})$$

(2)

- a) 変圧器の巻き数比が異なるため，変圧器間の2次側誘起電圧に差が生じる。

変圧器Aのタップ段数を3段下げたときに生じる2次側誘起電圧の差を \dot{V}_C [V]，循環電流を \dot{I}_C [A] とする。題意から負荷に流れる電流は無視できるので，

$$\dot{V}_C = \frac{154 \text{ kV}}{\sqrt{3}} \times \frac{3 \text{ kV} \times 3 \text{ 段}}{275 \text{ kV} - 3 \text{ kV} \times 3 \text{ 段}}, \quad \dot{I}_C = \frac{\dot{V}_C}{j(8 \Omega + 8 \Omega)} \text{ となる。}$$

これより

$$\dot{I}_C = \frac{\frac{154 \times 10^3}{\sqrt{3}} \times \frac{3 \text{ kV} \times 3 \text{ 段}}{275 \text{ kV} - 3 \text{ kV} \times 3 \text{ 段}}}{j(8 \Omega + 8 \Omega)} = \frac{\frac{154 \times 10^3}{\sqrt{3}} \times 0.033835}{j16} = -j188.02 \text{ A}$$

負荷はインピーダンスなので重ね合わせの理から， $\dot{I}'_A = \dot{I} + \dot{I}_C$ ， $\dot{I}'_B = \dot{I} - \dot{I}_C$ であるから，

$$\dot{I}'_A = 419.90 - j314.93 + (-j188.02) = 419.90 - j502.95 \text{ A}$$

$$\dot{I}'_B = 419.90 - j314.93 - (-j188.02) = 419.90 - j126.91 \text{ A}$$

$$I'_A = |\dot{I}'_A| = 655.19 \doteq 655 \text{ A} \cdots (\text{答})$$

$$I'_B = |\dot{I}'_B| = 438.66 \doteq 439 \text{ A} \cdots (\text{答})$$

b) タップ段数の差による遅れ無効電力の消費変化 ΔQ_L は, \dot{I}_C が流れることによる損失であるから,

$$\begin{aligned} \Delta Q_L &= 3 \times \left[\left(|\dot{I} + \dot{I}_C|^2 + |\dot{I} - \dot{I}_C|^2 \right) \times 8 \Omega - \left(|\dot{I}|^2 + |\dot{I}|^2 \right) \times 8 \Omega \right] \\ &= 3 \times 2 \times |\dot{I}_C|^2 \times 8 \Omega = 1\,696\,900 \doteq 1.70 \text{ Mvar} \cdots (\text{答}) \end{aligned}$$

[問5の標準解答]

(1) 以下の中から二つ記載されていればよい。なお、検出方法は具体的な方法又は検出方式名のどちらかが記載されていればよい。

・測定項目：各がいしの分担電圧

検出方法：分担電圧を測定し、その低下を検出する方法。その方式にはネオン管(ネオンランプ)式、音響(ギャップ)式、音響パルス式、自走式、光パルス式などがある。

・測定項目：各がいしの絶縁抵抗値

検出方法：静電容量の大きなコンデンサをがいしに並列に接続し、がいしの交流分担電圧を零にしてから、直流電圧を印加して絶縁抵抗値を測定し、その低下を検出する方法で、主に 275 kV・500 kV に用いられる。その方式には自走式不良がいし検出器を用いる方式がある。

・測定項目：各がいしからの漏れ電流

検出方法：漏れ電流を測定し、送電線からの漏れ電流に対する比率から不良がいしを検出する方法で主に 33 kV 以下に用いられる。その方式には KD 式がある。

- ・測定項目：がいし近傍の電界

検出方法：電界を測定し、その変化から不良がいしを検出する方法。その方式には電界測定式不良がいし検出器，MG 管式不良がいし検出器などを用いる方式がある。

- ・測定項目：各がいしの振動周波数

検出方法：音波を発信してがいしを振動させた状態でこれを用いて振動周波数を測定し、その低下から不良がいしを検出する方法。その方式にはドップラー振動計を用いる方式がある。

(2)

- a) ①：④，②：①

理由：質量のある避雷要素部を常時無課電で安定的に取り付けるため

- b) メカニズム：雷サージ過電圧の侵入時にギャップ付送電用避雷装置の気中ギャップがフラッシュオーバーして放電電流が流れた後，系統電圧による電流(続流)を避雷要素部の酸化亜鉛素子の特性により非常に小さく抑えて，ほとんど半サイクル以内に気中ギャップで消弧することにより，送電線トリップを防止する。

[問6の標準解答]

- (1) 10 MV・A 基準で，回路各部の%リアクタンスを単位法[p.u.]で表すと，電源側のリアクタンスは，

$$X_S = \frac{j20\%}{100\%} = j0.2\text{p.u.}$$

力率改善用コンデンサ設備のリアクタンスは，

$$X_{SC} = -j \frac{10\text{MV}\cdot\text{A}}{0.2\text{Mvar}} = -j50\text{p.u.}$$

コンデンサ単体のリアクタンスは，

$$X_C = X_{SC} \times \frac{Q_C}{Q} = -j50 \times \frac{213\text{kvar}}{200\text{kvar}} = -j53.25\text{p.u.}$$

直列リアクトル単体のリアクタンスは，

$$X_R = -X_{SC} \times \frac{Q_R}{Q} = j50 \times \frac{13 \text{ kvar}}{200 \text{ kvar}} = j3.25 \text{ p.u.}$$

よって、電源側に流出する第5高調波電流は、

$$\begin{aligned} I_{S5} &= 20 \times \frac{0.44}{6.6} \times \frac{5X_R + \frac{X_C}{5}}{5X_S + 5X_R + \frac{X_C}{5}} \\ &= 20 \times \frac{0.44}{6.6} \times \frac{5 \times j3.25 - j\frac{53.25}{5}}{5 \times j0.2 + 5 \times j3.25 - j\frac{53.25}{5}} \\ &= 20 \times \frac{0.44}{6.6} \times \frac{5.6}{6.6} = 1.131 \text{ 3 A} \end{aligned}$$

1.13 A . . . (答)

(2) 10 MV·A 基準で、変圧器のリアクタンスは、

$$X_T = j5\% \times \frac{10 \text{ MV} \cdot \text{A}}{0.5 \text{ MV} \cdot \text{A}} \times \frac{1}{100} = j1 \text{ p.u.}$$

よって、電源側に流出する第5高調波電流は、

$$\begin{aligned} I_{SS5} &= 20 \times \frac{0.44}{6.6} \times \frac{5X_R + \frac{X_C}{5}}{5X_S + 5X_R + \frac{X_C}{5} + 5X_T} \\ &= 20 \times \frac{0.44}{6.6} \times \frac{5 \times j3.25 - j\frac{53.25}{5}}{5 \times j0.2 + 5 \times j3.25 - j\frac{53.25}{5} + 5 \times j1} \\ &= 20 \times \frac{0.44}{6.6} \times \frac{5.6}{11.6} = 0.643 \text{ 68 A} \end{aligned}$$

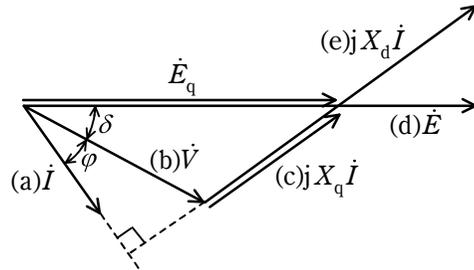
0.644 A . . . (答)

<機械・制御科目>

[問1の標準解答]

(1)

- ① (b), ② (d), ③ (a), ④ (e), ⑤ (c),



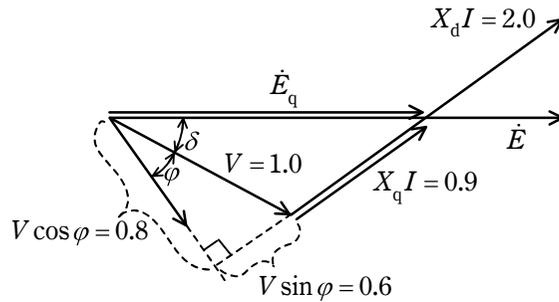
(2)

まず E_q を求める。

$V = 1.0$, $I = 1.0$, $\cos\phi = 0.8$, $X_q = 0.9$ より,

フェーザ図において,

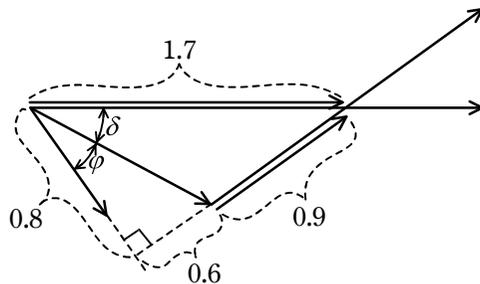
$V \cos\phi = 0.8$, $V \sin\phi = 0.6$, $X_q I = 0.9$



よって,

$$E_q = \sqrt{(V \cos\phi)^2 + (V \sin\phi + X_q I)^2} = \sqrt{0.8^2 + (0.6 + 0.9)^2} = 1.70 \text{ p.u.} \dots (\text{答})$$

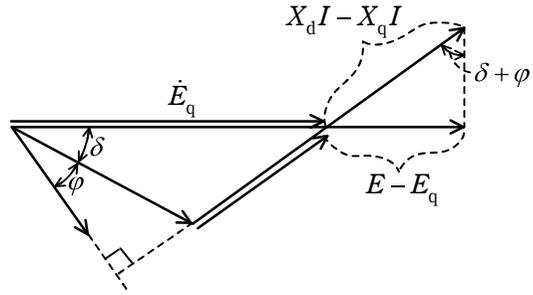
次に $\sin(\delta + \phi)$ を求める。



フェーザ図より,

$$\sin(\delta + \varphi) = \frac{0.6 + 0.9}{1.7} = 0.88235 \quad 0.882 \dots \text{ (答)}$$

次に, E を求める。



フェーザ図より,

$$E - E_q = (X_d I - X_q I) \sin(\delta + \varphi) = (2 - 0.9) \times 0.88235 = 0.97059$$

$$\therefore E = 0.97059 + 1.7 = 2.6706 \quad 2.67 \text{ p.u.} \dots \text{ (答)}$$

(3) E, V を一定とすると出力 P は負荷角 δ に応じて変化するので, ①式を δ で微分して,

$$\frac{dP}{d\delta} = \frac{VE}{X_d} \cos \delta + \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) V^2 \cos 2\delta$$

$\frac{dP}{d\delta} = 0$ のとき定態安定限界出力となり, そのときの負荷角が δ_m であるので,

$$\frac{VE}{X_d} \cos \delta_m + \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) V^2 \cos 2\delta_m = 0 \text{ より,}$$

$$X_q E \cos \delta_m + (X_d - X_q) V \cos 2\delta_m = X_q E \cos \delta_m + (X_d - X_q) V (2 \cos^2 \delta_m - 1) = 0$$

$$\therefore 2(X_d - X_q) V \cos^2 \delta_m + X_q E \cos \delta_m - (X_d - X_q) V = 0$$

$\cos \delta_m \geq 0$ より,

$$\cos \delta_m = \frac{-X_q E + \sqrt{(X_q E)^2 + 8(X_d - X_q)^2 V^2}}{4(X_d - X_q)V} \dots\dots\dots \textcircled{2}$$

…(答)

(4)

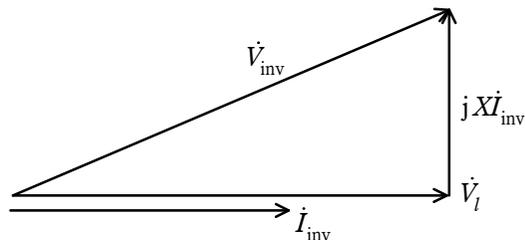
②式に、 $E = 2.6706$ 、 $V = 1.0$ 、 $X_d = 2.0$ 、 $X_q = 0.9$ を代入すると、

$$\cos \delta_m = \frac{-0.9 \times 2.6706 + \sqrt{(0.9 \times 2.6706)^2 + 8(2.0 - 0.9)^2}}{4 \times (2.0 - 0.9)} = \frac{1.5280}{4.4} = 0.34727$$

0.347・・・(答)

[問2の標準解答]

(1) インバータ出力電圧 \dot{V}_{inv} 、インバータ出力電流 \dot{I}_{inv} 、交流電源電圧 \dot{V}_l の関係を表すフェーザ図を示す。したがって、(a)が \dot{V}_{inv} 、(c)が \dot{V}_l 、(d)が \dot{I}_{inv} であり、残り (b) はリアクトル両端電圧 jXI_{inv} である。



(2) 交流電源には力率 1 で 10 kW の有効電力が供給されている。したがって、インバータ出力電流の実効値 I_{inv} は、

$$I_{inv} = \frac{10000}{V_l} = \frac{10000}{100} = 100 \text{ A}$$

リアクトルの電圧降下は $XI_{inv} = 0.75 \times 100 = 75 \text{ V}$ であるので、インバータ出力電圧 V_{inv} は次式で求まる。

$$V_{inv} = \sqrt{V_l^2 + (XI_{inv})^2} = \sqrt{100^2 + 75^2} = 125 \text{ V} \dots\dots\dots \text{(答)}$$

これから、インバータの出力電圧 v_{inv} の波高値 V_k 、PWM 制御の変調率 k は次式となる。

$$V_k = \sqrt{2} \times 125 = 176.78 \text{ V}$$

$$k = \frac{V_k}{E_d} = \frac{176.78}{200} = 0.88388 \rightarrow 0.884 \dots (\text{答})$$

次に、インバータが出力する有効電力 P は、回路の抵抗分は無視できるので、

$$P = 10000 \text{ W}$$

リアクトルに供給する無効電力 Q 、皮相電力 S は、次式となる。

$$Q = (XI_{inv}) \cdot I_{inv} = 75 \times 100 = 7500 \text{ var} \dots (\text{答})$$

$$S = V_{inv} I_{inv} = 125 \times 100 = 12500 \text{ V} \cdot \text{A} \dots (\text{答})$$

また、インバータは損失がないものとしているので、電池に流れる直流電流平均値 I_{dc} は、次式となる。

$$I_{dc} = \frac{P}{E_d} = \frac{10000}{200} = 50 \text{ A} \dots (\text{答})$$

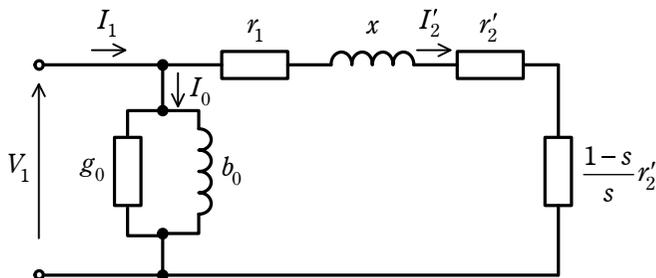
- (3) 変調率が $0 \leq k \leq 1$ の範囲で V_{inv} の交流電圧を出力できる最低の電池電圧 E_{dmin} は、変調率 k が $k=1$ になったときである。このときの電池電圧は小問(2)で求めたインバータ出力電圧波高値 V_k に等しいので、

$$\frac{E_{dmin}}{E_{d0}} = \frac{176.78}{200} = 0.88388 \rightarrow 88.4 \% \dots (\text{答})$$

が最小値である。

[問3の標準解答]

- (1) 等価回路



(2) 等価回路定数の導出

【 r_1 の導出】

測定値が直流抵抗なのか交流抵抗なのか明記されていないので、表皮効果などを含んだ交流抵抗への換算は行わず、測定値をそのまま使用する。

t [°C]で抵抗を測定しているので基準温度 T [°C]の抵抗値に換算する。与えられた式を変形すると次のようになる。

$$R(t) = R(0)[1 + \alpha_0(t-0)]$$

$$R(T) = R(0)[1 + \alpha_0(T-0)] = \frac{1 + \alpha_0(T-0)}{1 + \alpha_0(t-0)} R(t)$$

測定は端子間で行ったので、1相あたりの抵抗値は測定値の $\frac{1}{2}$ となる。したがって、基準温度 T [°C]における一次抵抗値 r_1 は次の式で表される。

$$r_1 = \frac{\frac{1}{\alpha_0} + T}{\frac{1}{\alpha_0} + t} \cdot \frac{R_1}{2}$$

$\alpha_0 = \frac{1}{235}$ を代入すると次のようになる。

$$r_1 = \frac{235 + T}{235 + t} \cdot \frac{R_1}{2} \text{ [\Omega]} \quad \dots (\text{答})$$

【 g_0, b_0 の導出】

定格電圧を印加した無負荷試験においては、回転子はほぼ同期速度で回転しているため、滑り $s=0$ と考えることができる。このとき、 $I_2' \ll I_0$ と考えられる。したがって、 $I_2' = 0$ と仮定できるので、励磁回路の電流 I_0 のみが流れていると考える。

また、端子電圧を低下させて運転した場合、鉄損はほぼ電圧の2乗に比例して変化するが、機械損はほぼ同期速度で回転しているため一定であると考え

ことができる。したがって、電圧ゼロに外挿して求めた P_m は機械損と考えられるので、測定結果から差し引く必要がある。

さらに、拘束試験での電圧の測定値は端子電圧であるので、これを相電圧に変換することが必要である。

以上の考え方をを用いると、定格電圧における無負荷試験の消費電力は励磁コンダクタンス g_0 の消費電力と考えることができるので、次のように g_0 を求めることができる。ここで、1相分の等価回路を求めるので電力の測定値は相数 (=3) で割る必要がある。

$$g_0 = \frac{P_N - P_m}{3 \left(\frac{V_N}{\sqrt{3}} \right)^2} = \frac{P_N - P_m}{V_N^2} \text{ [S]} \dots (\text{答})$$

この結果を使って、次のように励磁サセプタンス b_0 を求めることができる。

$$b_0 = \sqrt{\left(\frac{I_N}{\frac{V_N}{\sqrt{3}}} \right)^2 - \left(\frac{P_N - P_m}{3 \left(\frac{V_N}{\sqrt{3}} \right)^2} \right)^2} \text{ [S]} \dots (\text{答})$$

【 r'_2 , x の導出】

回転子を拘束しているなので、滑り $s=1$ であり、このとき、 $I_0 \ll I'_2$ と考えられる。また、拘束試験では、定格電流が流れる状態において印加する電圧は定格電圧に比べ低い値となる。そのため、励磁回路にはほとんど電流が流れないと考えられるので励磁コンダクタンス g_0 による損失は生じない。また、拘束しているので機械損 P_m は生じない。 $I_0 = 0$ と仮定すると、測定電流は負荷回路の電流 I'_2 のみが流れていると考えることができる。したがって、拘束試験時の回路は r_1 , r'_2 , x の直列回路と考えることができる。

これらを考慮すると、測定値から次の関係が得られる。

$$3(r_1 + r'_2)I_s^2 = P_s$$

したがって、

$$r_1 + r_2' = \frac{P_s}{3I_s^2}$$

r_2' を求めるには、 r_1 を差し引けばよいので、 r_2' は次の式で求めることができる。

$$r_2' = \frac{P_s}{3I_s^2} - r_1 \text{ [}\Omega\text{]} \cdots \text{(答)}$$

この結果を使ってリアクタンスを求めることができるが、拘束試験での電圧の測定値は端子電圧であるので、これを相電圧に変換することが必要である。したがって、

$$x = \sqrt{\left(\frac{\frac{V_s}{\sqrt{3}}}{I_s}\right)^2 - \left(\frac{P_s}{3I_s^2}\right)^2} \text{ [}\Omega\text{]} \cdots \text{(答)}$$

[問4の標準解答]

(1) フィードバック結合を等価変換する。

$$W(s) = \frac{5}{s(s+2)} \cdot \frac{5}{1 + \frac{5}{s(s+2)}} = \frac{5}{s(s+2)+5} = \frac{5}{s^2+2s+5} \cdots \text{①}$$

⋯(答)

(2) 二次系の標準形は

$$\frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \cdots \text{②}$$

であるから、①式と②式を比較することで

$$\omega_n^2 = 5 \cdots \text{③}$$

$$2\zeta\omega_n = 2 \cdots \text{④}$$

の関係式を得る。③式、④式を解いて

$$\omega_n = \sqrt{5}, \quad \zeta = \frac{1}{\sqrt{5}} \cdots \text{⑤}$$

⋯(答)

となる。

(3) 制御量 $Y(s)$ は次のようになる。

$$Y(s) = W(s) \frac{1}{s} = \frac{5}{s(s^2 + 2s + 5)} \dots\dots\dots \textcircled{6}$$

⑥式は次の形に分解することができる。

$$\frac{5}{s(s^2 + 2s + 5)} = \frac{A}{s} + \frac{Bs + C}{s^2 + 2s + 5} \dots\dots\dots \textcircled{7}$$

⑦式の両辺の分母を払うと

$$5 = (A + B)s^2 + (2A + C)s + 5A \dots\dots\dots \textcircled{8}$$

となるので、係数比較法により

$$A = 1, \quad B = -1, \quad C = -2 \dots\dots\dots \textcircled{9}$$

と求められる。

よって、制御量の時間応答 $y(t)$ は、

$$\begin{aligned} y(t) &= \mathcal{L}^{-1} \left[\frac{1}{s} - \frac{s+2}{s^2 + 2s + 5} \right] \\ &= \mathcal{L}^{-1} \left[\frac{1}{s} - \frac{s+1}{(s+1)^2 + 2^2} - \frac{1}{2} \cdot \frac{2}{(s+1)^2 + 2^2} \right] \\ &= 1 - e^{-t} \cos 2t - \frac{1}{2} e^{-t} \sin 2t \dots\dots\dots \textcircled{10} \end{aligned}$$

…(答)

となる。

(4) 小問(3)で求めた⑩式を時間微分する。

$$\begin{aligned} \frac{dy(t)}{dt} &= 0 + e^{-t} \cos 2t + 2e^{-t} \sin 2t + \frac{1}{2} e^{-t} \sin 2t - e^{-t} \cos 2t \\ &= \frac{5}{2} e^{-t} \sin 2t \dots\dots\dots \textcircled{11} \end{aligned}$$

⑪式より、 $\frac{dy(t)}{dt} = 0$ となるのは、

$$2t = n\pi, \quad n = 0, 1, 2, \dots \dots \dots \textcircled{12}$$

であって、 $n=1$ のときに最大となる。すなわち、

$$2t_p = \pi$$

$$\therefore t_p = \frac{\pi}{2} \dots\dots\dots \textcircled{13}$$

…(答)

である。

(5) ⑩式の t に⑬式の t_p を代入する。

$$y(t_p) = 1 - e^{-t_p} \cos 2t_p - \frac{1}{2} e^{-t_p} \sin 2t_p$$

$$= 1 - e^{-\frac{\pi}{2}} \left(\cos \pi + \frac{1}{2} \sin \pi \right)$$

$$= 1 + e^{-\frac{\pi}{2}} \dots\dots\dots \textcircled{14}$$

…(答)