

●平成27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) 水車出力  $P$  は、理論出力×水車効率で求められ、今、水車 A 及び水車 B の水車効率は同一であることから、

$$\begin{aligned} P_2 &= 9.8 \times Q_2 \times H_2 \times \rho \times \frac{\eta}{100} \times \frac{1}{1000} \\ &= 9.8 \times 10 \times 121 \times 1000 \times \frac{\left(1 \times \frac{100}{9.8 \times 0.121 \times 1}\right)}{100} \times \frac{1}{1000} \\ &= 10000 \text{ kW} \cdots (\text{答}) \end{aligned}$$

- (2) 水車使用水量は、流速×ランナ入口断面積で表され、流速は各有効落差の  $\frac{1}{2}$  乗に比例し、水車 A 及び水車 B のランナ入口断面積比は相似比の 2 乗であるため、

$$\begin{aligned} \frac{Q_2}{Q_1} &= \sqrt{\frac{H_2}{H_1}} \times \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^2 \\ Q_2 &= k^2 \sqrt{\frac{H_2}{H_1}} \times Q_1 \text{ [m}^3/\text{s]} \cdots (\text{答}) \end{aligned}$$

- (3) 水車出力は理論水力×水車効率で表されるため、水車 A 及び水車 B の水車出力比は、

$$\begin{aligned} \frac{P_2}{P_1} &= \frac{\frac{9.8Q_2H_2\rho\frac{\eta}{100}}{1000}}{\frac{9.8Q_1H_1\rho\frac{\eta}{100}}{1000}} \\ &= \frac{Q_2H_2}{Q_1H_1} \end{aligned}$$

上記(2)の結果を代入すると、

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{\left(k^2 \sqrt{\frac{H_2}{H_1}} \times Q_1\right) H_2}{Q_1 H_1} = k^2 \left(\frac{H_2}{H_1}\right)^{\frac{3}{2}}$$

$$P_2 = k^2 \left(\frac{H_2}{H_1}\right)^{\frac{3}{2}} \times P_1 \quad [\text{kW}] \quad \cdots \quad (\text{答})$$

(4) 上記(1)及び(3)から  $k$  を求めると,

$$k = \left[ \left(\frac{P_2}{P_1}\right) \times \left(\frac{H_2}{H_1}\right)^{-\frac{3}{2}} \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$= \left[ \left(\frac{10000}{1}\right) \times \left(\frac{1}{121}\right)^{\frac{3}{2}} \right]^{\frac{1}{2}} = 2.741$$

$$D_2 = k \times D_1 = 2.741 \times 0.4 \doteq 1.10 \text{ m} \quad \cdots \quad (\text{答})$$

(5) 回転数は、ランナ周辺速度 (= 流速) をランナ円周で除したものであるため、水車 A 及び水車 B の回転速度比は、

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{\frac{\sqrt{H_2}}{\pi D_2} \times 60}{\frac{\sqrt{H_1}}{\pi D_1} \times 60}$$

$$= \frac{\sqrt{\frac{H_2}{H_1}}}{k}$$

$$= \frac{\sqrt{\frac{H_2}{H_1}}}{\left[ \left(\frac{P_2}{P_1}\right) \times \left(\frac{H_2}{H_1}\right)^{-\frac{3}{2}} \right]^{\frac{1}{2}}}$$

$$= \frac{\left(\frac{H_2}{H_1}\right)^{\frac{5}{4}}}{\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{1}{2}}}$$

$$\begin{aligned} N_2 &= \frac{\left(\frac{H_2}{H_1}\right)^{\frac{5}{4}}}{\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{1}{2}}} \times N_1 \\ &= \frac{121^{\frac{5}{4}}}{10000^{\frac{1}{2}}} \times 149.5 \\ &\doteq 600 \text{ rpm} \cdots (\text{答}) \end{aligned}$$

[問2の標準解答]

(1) 電力系統各部の機器，設備の絶縁の強さに関して，技術上，経済上並びに運用上からみて最も合理的な状態になるように協調を図ることをいう。

(2)

a. 送電設備

送電線の耐雷設計として最も一般的に行われているのは，電力線に直撃雷が侵入しないように送電線を遮へいする架空地線の布設である。

架空地線を布設しても，雷撃電流の波高値が小さな雷では遮へい失敗し，電力線へ直接侵入することがある。このとき発生する過電圧が大きいとアークホーンでフラッシュオーバーする（正フラッシュオーバー）。また，架空地線や鉄塔へ雷撃があった場合，雷電流が大きいとアークホーンで逆フラッシュオーバーが発生し，電力線に雷が侵入する。

雷によるフラッシュオーバーに伴う送電線事故は再送電が可能なことが多いため，ある程度の事故（フラッシュオーバー）率は許容して，送電設備の小型化を図り，建設コストの上昇を抑えている。500 kV 送電線では，架空地線を一般的に2条布設し，また架空地線を電力線より外側に布設し負の遮へい角とし，下位電圧よりフラッシュオーバーを減らし，送電線事故を減少させている。

遮へい失敗や鉄塔部での逆フラッシュオーバーにより電力線に侵入した雷電流は，アークホーンにより制限されるものの，電力線を伝搬して変電所に侵入し，極めて高い過電圧を発生させる。この過電圧については，以下に示すように変電設備側で対策を実施している。

b. 変電設備

変電所の耐雷設計では一般に，変電所近傍の鉄塔への落雷による逆フラッシュオーバーによる近接雷と電力線を伝搬してくる遠方雷を考慮する。これらの雷過電圧に耐える絶縁強度を機器（変圧器や開閉器）にもたせることは経済的ではないため，変電所内に避雷器を設置し，最適位置に配置することにより雷過電圧を抑制し，効果的な絶縁協調を図っている。

避雷器の設置により過電圧抑制のための機器代は増加するものの，過電圧を確実に抑制できるため，低減した絶縁強度の変圧器や開閉器が採用でき，

主要機器代が減少し、技術上、経済上並びに運用上から合理的な設計にすることができる。

500 kV の GIS 変電所を例にとると、想定雷撃電流は 150 kA を採用している。GIS 母線の広がり下位電圧の母線より大きいことから、避雷器は線路引込口及び変圧器近傍に設置することが一般的である。雷インパルス試験電圧は、変圧器は 1300 kV、GIS は 1425 kV を採用している。

以上のように、送変電設備を一貫した耐雷設計が行われている。

- (3) 配電設備は送電設備と異なり、絶縁レベルが相対的に低く、機器が分散配置されていることから、雷事故を軽減するためには耐雷対策に十分な配慮を要する。雷過電圧の発生要因は配電線への直撃雷と、近隣の落雷により発生する強い電磁界による誘導雷の 2 種類がある。後者による発生電圧は数百キロボルト程度にとどまり、送電線では脅威にならない。

配電設備の耐雷対策としては、架空地線で電力線と機器とを遮へいする方法と、侵入した雷による過電圧抑制や機器保護のため避雷器やアークホーンを用いる方法があり、これらを組合せることが有効である。開閉器、変圧器などの主要な機器は、避雷器を内蔵したり、極力近傍に設置して保護している。線路も保護範囲を考慮して避雷器を適切に設置したり、電線や碍子の雷による被害を防止するために、アークホーンを設置して保護している。

[問3の標準解答]

- (1) 変圧器一次側端子から負荷側をみた等価抵抗を  $r$  (変圧器漏れリアクタンスがないためリアクタンス成分は零である。) とすると,

$$r = \frac{R}{n^2}$$

と表されるので, 変圧器一次側電圧  $V_1$  は,

$$V_1 = \frac{r}{\sqrt{r^2 + X^2}} E$$

したがって, 二次側電圧  $V_2$  は,

$$V_2 = nV_1 = \frac{R}{\sqrt{\frac{R^2}{n^2} + n^2 X^2}} E$$

と表せる。したがって, 空欄には

$$\frac{R^2}{n^2} + n^2 X^2 \quad \dots \quad (\text{答})$$

が入る。

- (2)  $n$  以外が全て一定であるから,

$$f(n) = \frac{R^2}{n^2} + n^2 X^2$$

の増減について調べればよい。 $n$  について微分すれば,

$$f'(n) = -\frac{2R^2}{n^3} + 2nX^2$$

であるから,

$$\frac{R}{n^2} < X \quad \dots \quad (\text{答})$$

の場合に  $f(n)$  は増加関数となる。このとき, 上記(1)にて求めた  $V_2$  が  $n$  増加時に減少する。これが求めるべき不等式である。

- (3) 題意より二次側電圧  $V_2$  が低くなると  $n$  を上げるよう自動制御されている。

したがって, 上記(2)にて求めた条件下で  $V_2$  が低下すると  $n$  が増大し, これが更なる  $V_2$  の低下を生む。これは電圧が不安定に陥っていることを意味する。

- (4) 図2の曲線は  $R$  以外のパラメータを全て一定とし,  $R$  のみ変化させた場合の特性であり, 点Lは負荷電力  $P$  の極大点である。負荷電力  $P$  は,

$$P = \frac{V_2^2}{R} = \frac{R}{\frac{R^2}{n^2} + n^2 X^2} E^2$$

と表される。したがって, Lは関数

$$g(R) = \frac{R}{\frac{R^2}{n^2} + n^2 X^2}$$

が極大となる条件によって決まる。 $g(R)$ を $R$ について微分して零と置けば,

$$g'(R) = \frac{\frac{R^2}{n^2} + n^2 X^2 - R \cdot \frac{2R}{n^2}}{\left(\frac{R^2}{n^2} + n^2 X^2\right)^2} = 0$$

より  $n^2 X^2 = \frac{R^2}{n^2}$

すなわち  $\frac{R}{n^2} = X$

が得られ、上記(2)にて求めた安定性の限界点と一致している。

[問4の標準解答]

(1)

- ・直列リアクトルは、高調波に対して進相コンデンサ設備の回路を誘導性にし、進相コンデンサのキャパシタンスと系統の変圧器や線路のリアクタンスとの共振による高調波電流の拡大を防止する。
- ・コンデンサ投入時の突入電流や異常電圧発生を抑制する。

(2)

【高調波抑制の原理】

LCフィルタは、コンデンサ、リアクトルといった受動（パッシブ）素子を組み合わせ、特定の周波数又は周波数領域で低インピーダンスとなる分路を構成し、高調波電流を吸収する。

【設置に当たり留意すべき点】

下記のような解答が、いずれか2項目記載されていればよい。

- ・無負荷時に母線電圧が上昇するため、高調波発生機器の停止時は進み力率を避けるため、LCフィルタを開放することが望ましい。
- ・系統反共振点での高調波不安定現象

LCフィルタは、発生する高調波次数に対応した分路を組み合わせるため、分路の次数や低次側に電力系統インピーダンスとの共振点が現れる。共振している次数の高調波が存在すると、その高調波電流が増加して変換装置が運転不能となるため留意する必要がある。

- ・遮断器の選定

LCフィルタは、進相コンデンサに比べて高調波電流の流入量が多いため、遮断後の回復電圧が大きくなる。このため、遮断直後の過渡回復電圧抑制用サージアブソーバの設置や1ランク上位の電圧定格をもった遮断器の採用などが必要となる。

- ・LCフィルタの電流耐量

LCフィルタは電力系統内で第 $n$ 次高調波に対して短絡回路を形成するため、電流耐量に留意する必要がある。

- ・励磁突入電流の引き込みが大きい場合には、耐量向上又は運用上の対策が必要となる。
- ・同調フィルタの並設時は、それぞれのLCフィルタの同調点をずらして



フィルタインピーダンスを大きくする。

(3)

下記のような解答が、いずれか3項目記載されていればよい。

需要家側の対策

- ・静止形無効電力補償装置（SVC，SVG）等を施設する。
- ・アーク電流が不安定な交流アーク炉に代え，安定した電流が得られる直流アーク炉を採用する。
- ・一次側に直列過飽和リアクトルを接続する。

供給側の対策

- ・変動負荷を専用線あるいは専用変圧器により供給する。
- ・高圧配電線の昇圧，電線の太線化など電源側インピーダンスの低減を図る。

[問5の標準解答]

(1)

a. 選択性

保護対象区間の事故などの異常状態だけを識別し、必要最小限の範囲の遮断で事故区間を停止して、その他の設備を不必要に遮断させない能力を有すること。

b. 信頼性

誤動作・誤不動作は許されず、正動作・正不動作が要求されること。無保護区間がないようにし、また保護区間外事故で誤動作することのないように保護協調をとる。具体的には複数のリレーの組み合わせ、二重化、後備保護の設置などがある。

c. 動作感度

系統構成、需要などの運転状況、事故様相などによって変化する事故電流、電圧の大小によって、保護性能に影響を受けないような動作感度を確保できること。

d. 動作速度

電力系統の安定度維持、機器破損の回避及び事故拡大防止に必要な高速動作が可能なこと。

(2) 主保護とは、ある事故に対しまず動作することが求められている第一の保護で、事故区間だけを選択遮断することを目的としている。何らかの原因で主保護動作に失敗した場合に備え、第二、第三の保護、すなわち後備保護が設置されている。後備保護は主保護による保護が行われないと判断してから保護するため、一般的に遮断時間が遅くなり、また、広範な遮断となる。

重要度の高い基幹系送電線においては、主保護を2組設置し、いずれかのリレーでも遮断器を動作できるようにしている。この2組のリレーは一般的には同じリレーとすることが多い。また、遮断器のトリップ回路も2系統にしている。これらにより送電線事故除去に対し、保護信頼度の向上を図っている。

[問 6 の標準解答]

(1) 定格出力  $P_r$  [MW], 定格周波数  $f_r$  [Hz], 速度調定率  $R$  [%] の同期発電機が出力  $P$  [MW], 周波数  $f$  [Hz] で運転しているとする。

発電機出力が  $P'$  [MW] に変化したときの周波数  $f'$  [Hz] は, 速度調定率の定義式から以下のようなになる。

$$f' = f + \frac{Rf_r}{100 P_r} (P - P') \text{ [Hz]} \quad \dots\dots\dots \text{①}$$

発電機 A の出力が  $P_a$  [MW] から  $P_a - 10$  [MW] に変化したときに周波数が  $f$  [Hz] から  $f + \Delta f$  [Hz] に変化したとすると,

$$f + \Delta f = f + \frac{4 \times 50}{100 \times 200} (P_a - P_a + 10) \text{ [Hz]} \quad \dots\dots\dots \text{②}$$

が成り立つ。ここで,  $f = 50$  である。

これを解くと,  $\Delta f = 0.1$  Hz となる。

したがって, 正解は, 0.1 Hz の上昇, 又は, 50.1 Hz への上昇 … (答)

(2) 発電機 A の出力が  $P_a$  [MW], 発電機 B の出力が  $P_b$  [MW] で並列運転をしていて系統周波数が 50 Hz に保たれているとする。出力合計が  $P_a + P_b - 10$  [MW] となったときの系統周波数を  $50 + \Delta f$  [Hz] とすると, 下式が成り立つ。

$$50 + \Delta f = 50 + \frac{4 \times 50}{100 \times 200} (P_a - P'_a) \text{ [Hz]} \quad \dots\dots\dots \text{③}$$

$$50 + \Delta f = 50 + \frac{3 \times 50}{100 \times 100} (P_b - P'_b) \text{ [Hz]} \quad \dots\dots\dots \text{④}$$

$$P'_a + P'_b = P_a + P_b - 10 \text{ [MW]} \quad \dots\dots\dots \text{⑤}$$

③式から④式を減算すると, 下式を得る。

$$P_a - P'_a = 1.5(P_b - P'_b) \text{ [MW]} \quad \dots\dots\dots \text{⑥}$$

⑥式を⑤式に代入すると, 下式を得る。

$$P'_b - P_b = -4 \text{ MW} \quad \dots\dots\dots \text{⑦}$$

⑦式を④式に代入すると, 下式を得る。

$$\Delta f = 0.06 \text{ Hz} \quad \dots\dots\dots \text{⑧}$$

したがって、正解は、0.06 Hz の上昇、又は、50.06 Hz への上昇 …… (答)

(3) 系統負荷の減少量は、 $250-200 = 50$  MW。(2)の解から、系統周波数は、

$$0.06 \times \frac{50}{10} = 0.3 \text{ Hz} \quad \dots\dots\dots \textcircled{9}$$

だけ、増加する。 $49.9+0.3 = 50.2$

したがって、系統周波数は、50.2 Hz …… (答)

発電機 A の出力が  $P'_a$  [MW] になったとすると、①式から、

$$50.2 = 49.9 + \frac{4 \times 50}{100 \times 200} (150 - P'_a) \text{ [Hz]} \quad \dots\dots\dots \textcircled{10}$$

を充たす。これを解くと、 $P'_a = 120$  MW

したがって、発電機 A の出力は、120 MW …… (答)

発電機 B の出力は、 $200-120 = 80$  MW …… (答)

<機械・制御科目>

[問1の標準解答]

(1) 誘導電動機の発生トルクは、同期角速度を  $\omega_s$  とすると、L形簡易等価回路から、

$$T = \frac{1}{\omega_s} \cdot \frac{V_1^2}{\left(r_1 + \frac{r_2'}{s}\right)^2 + (x_1 + x_2')^2} \cdot \frac{r_2'}{s}$$

となるが、 $s$ の小さい範囲では、 $\frac{r_2'}{s}$ が  $r_1$ 、 $x_1$ 、 $x_2'$ に対して十分大きいので、

上式のトルクの式は、近似的に、

$$T \doteq \frac{1}{\omega_s} \cdot \frac{V_1^2}{r_2'} s$$

と表すことができる。このため、電動機のトルクは供給電圧が一定の時は滑りに比例するので、 $V_2$ における電動機のトルク特性上において次式が成り立つ。

$$\frac{T_3}{s_1} = \frac{T_2}{s_2} \dots\dots\dots ①$$

滑りが一定のとき、トルクは供給電圧の2乗に比例するため、

$$\frac{T_1}{T_3} = \frac{V_1^2}{V_2^2} \dots\dots\dots ②$$

①、②式より、 $T_3$ を消去すると、

$$T_1 = \frac{s_1}{s_2} \cdot \frac{V_1^2}{V_2^2} T_2 \dots\dots\dots ③$$

また、負荷のトルクは回転速度の2乗に比例するので、次式が成り立つ。

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{(1-s_1)^2}{(1-s_2)^2} \dots\dots\dots ④$$

④式に③式を代入すると、

$$\frac{(1-s_2)^2}{s_2} = \frac{(1-s_1)^2}{s_1} \cdot \frac{V_2^2}{V_1^2}$$

ここで、題意から  $V_2 = 0.88V_1$ 、 $s_1 = 0.025$  であるので、上式の右辺に代入すると、

$$\frac{(1-s_2)^2}{s_2} = \frac{(1-0.025)^2}{0.025} \cdot \frac{(0.88V_1)^2}{V_1^2} = 29.447$$

$$s_2^2 - 31.447s_2 + 1 = 0$$

$$\therefore s_2 = \frac{31.447 \pm \sqrt{31.447^2 - 4}}{2} = \frac{31.447 \pm 31.383}{2} = 0.031832, 31.415$$

ここで、 $0 < s_2 < 1$  であるから、 $s_2 = 0.031832$  である。したがって、求める滑りの比は、

$$\frac{s_2}{s_1} = \frac{0.031832}{0.025} = 1.2733 \rightarrow 1.27 \quad \dots \text{ (答)}$$

- (2) 負荷の所要動力は電動機出力に等しいので、出力は回転速度の 3 乗に比例する。供給電圧変化前後の電動機出力を、 $P_{01}$ 、 $P_{02}$  とすると、

$$P_{02} = \frac{(1-s_2)^3}{(1-s_1)^3} P_{01} = \frac{(1-0.031832)^3}{(1-0.025)^3} P_{01} = \frac{0.90751}{0.92686} P_{01} = 0.97912 P_{01}$$

したがって、求める電動機出力の比は、

$$\frac{P_{02}}{P_{01}} = 0.97912 \rightarrow 0.979 \quad \dots \text{ (答)}$$

- (3) 供給電圧変化前後の二次銅損を  $P_{c21}$ 、 $P_{c22}$ 、二次電流を  $I_{21}$ 、 $I_{22}$  とすると、電動機出力と二次銅損の関係式から、二次抵抗を  $r_2$  (一定) として、

$$P_{c21} = r_2 I_{21}^2 = \frac{s_1}{1-s_1} P_{01} \quad \dots \dots \dots \text{ (5)}$$

$$P_{c22} = r_2 I_{22}^2 = \frac{s_2}{1-s_2} P_{02} \quad \dots \dots \dots \text{ (6)}$$

であるので、求める二次電流の比は、

$$\frac{I_{22}}{I_{21}} = \sqrt{\frac{s_2}{1-s_2} \cdot \frac{1-s_1}{s_1} \cdot \frac{P_{o2}}{P_{o1}}} = \sqrt{\frac{0.031832}{1-0.031832} \cdot \frac{1-0.025}{0.025} \cdot 0.97912}$$

$$= 1.1205 \rightarrow 1.12 \quad \dots \text{ (答)}$$

(4) 供給電圧変化前後の効率を  $\eta_1$ ,  $\eta_2$  とすると,

$$\eta_1 = \frac{P_{o1}}{P_{o1} + P_{c11} + P_{c21} + P_{i1}} \quad \dots \dots \dots \text{ ⑦}$$

$$\eta_2 = \frac{P_{o2}}{P_{o2} + P_{c12} + P_{c22} + P_{i2}} \quad \dots \dots \dots \text{ ⑧}$$

ただし、供給電圧変化前後の一次銅損を  $P_{c11}$ ,  $P_{c12}$ , 二次銅損を  $P_{c21}$ ,  $P_{c22}$ , 及び鉄損を  $P_{i1}$ ,  $P_{i2}$  とする。

供給電圧  $V_1$  において、題意から、鉄損  $P_{i1}$  と二次銅損  $P_{c21}$  の比は 3:5 であり、 $P_{c11}$  と  $P_{c12}$  とは等しいので、

$$P_{i1} = \frac{3}{5} P_{c21} = 0.6 P_{c21}$$

$$P_{c11} = P_{c21}$$

また、⑤式から、

$$P_{o1} = \frac{1-s_1}{s_1} P_{c21} = \frac{1-0.025}{0.025} P_{c21} = 39 P_{c21}$$

以上の  $P_{i1}$ ,  $P_{c11}$ ,  $P_{o1}$  を⑦式に代入すると、

$$\eta_1 = \frac{39 P_{c21}}{39 P_{c21} + 2 P_{c21} + 0.6 P_{c21}} = \frac{39}{39 + 2 + 0.6} = 0.9375 \quad \dots \dots \dots \text{ ⑨}$$

供給電圧  $V_2$  において、⑥式から、

$$P_{o2} = \frac{1-s_2}{s_2} P_{c22} = \frac{1-0.031832}{0.031832} P_{c22} = 30.415 P_{c22}$$

鉄損は入力電圧の 2 乗に比例するので、供給電圧変化前後の鉄損をそれぞれ  $P_{i1}$ ,  $P_{i2}$  とすると、題意から  $V_2 = 0.88 V_1$  を用いて、

$$\frac{P_{i2}}{P_{i1}} = \frac{V_2^2}{V_1^2} = \frac{(0.88 V_1)^2}{V_1^2} = 0.88^2 = 0.7744$$

$$\therefore P_{i2} = 0.7744 P_{i1}$$

一次銅損は電流の 2 乗に比例するので、供給電圧変化前後の一次銅損をそれぞれ  $P_{c11}$ ,  $P_{c12}$  とすると、(3)の結果を用いて、

$$\frac{P_{c12}}{P_{c11}} = \left( \frac{I_{22}}{I_{21}} \right)^2 = 1.1205^2 = 1.2555$$

$$\therefore P_{c12} = 1.2555P_{c11}$$

二次銅損についても同様にして、供給電圧変化前後の二次銅損をそれぞれ  $P_{c21}$ ,  $P_{c22}$  とすると、

$$P_{c22} = 1.2555P_{c21}$$

以上の  $P_{i2}$ ,  $P_{c12}$ ,  $P_{o2}$  を⑧式に代入すると、

$$\begin{aligned} \eta_2 &= \frac{30.415P_{c22}}{30.415P_{c22} + 1.2555P_{c11} + 1.2555P_{c11} + 0.7744P_{i1}} \\ &= \frac{30.415 \times 1.2555P_{c21}}{30.415 \times 1.2555P_{c21} + 1.2555P_{c21} + 1.2555P_{c21} + 0.7744 \times 0.6P_{c21}} \\ &= \frac{30.415 \times 1.2555}{30.415 \times 1.2555 + 1.2555 + 1.2555 + 0.7744 \times 0.6} \\ &= 0.92771 \dots \dots \dots \textcircled{10} \end{aligned}$$

よって、求める効率の比は、⑨式及び⑩式から、

$$\frac{\eta_2}{\eta_1} = \frac{0.92771}{0.9375} = 0.98956 \rightarrow 0.990 \dots \text{(答)}$$



[問2の標準解答]

(1) 単位法では、 $X_S$  [p.u.] は、短絡比の逆数となる。

$$X_S = \frac{1}{0.5} = 2.00 \text{ p.u.} \quad \dots \text{ (答)}$$

(2)  $\dot{V}$  を位相基準にとり、

$$\dot{V} = V$$

負荷角  $\delta$  から、

$$\dot{E} = E(\cos \delta + j \sin \delta)$$

$$\dot{E} = \dot{V} + jX_S \dot{I}$$

$$\dot{I} = \frac{\dot{E} - \dot{V}}{jX_S} = \frac{E \cos \delta - V + jE \sin \delta}{jX_S} = \frac{E \sin \delta - j(E \cos \delta - V)}{X_S}$$

複素電力は次式となる。

$$\begin{aligned} P + jQ &= \dot{V} \bar{\dot{I}} \\ &= V \frac{E \sin \delta + j(E \cos \delta - V)}{X_S} \\ &= \frac{VE \sin \delta + j(VE \cos \delta - V^2)}{X_S} \end{aligned}$$

したがって、有効電力  $P$  [p.u.] は

$$P = \frac{VE \sin \delta}{X_S} \quad \dots \text{ (答)}$$

となる。

これから、

$$E \sin \delta = \frac{PX_S}{V}$$

となり、 $P$ 、 $V$  が一定であること及び周波数が一定から  $X_S$  が一定であるため、 $I_f$  及び  $E$  を変化させても、 $E \sin \delta$  は一定となる。

} ... (答)

(3) 前項から、複素電力は次式である。

$$P + jQ = \frac{VE \cos \delta + j(VE \cos \delta - V^2)}{X_S}$$

これから、無効電力  $Q$  [p.u.] は、

$$Q = \frac{VE \cos \delta - V^2}{X_S} \quad \dots \text{ (答)}$$

である。

これから、

$$E \cos \delta = \frac{QX_S + V^2}{V}$$

となり、 $Q$ 、 $V$ が一定であること及び周波数が一定から $X_S$ が一定であるため、 $I_f$ 及び $E$ を変化させても、 $E \cos \delta$ は一定となる。

…(答)

(4) 鉄心の磁気飽和を無視しているため、 $E$ は $I_f$ に比例する。また、無負荷状態にて $V = 1$  p.u. のときは、 $E = 1$  p.u. で $I_f = I_{f0}$ であるため、 $k_{IF} = 1.0$ となる。

その結果、 $k_{IF}$ は $E$ のp.u.の数値と同じになる。

$k_{IF} = 2$  から、

$E = 2.00$  p.u. となる。… (答)

$P = 0.5$  p.u. ,  $V = 1$  p.u. ,  $X_S = 2$  p.u. 及び  $E = 2$  p.u. から、

$$E \sin \delta = \frac{PX_S}{V} = \frac{0.5 \times 2}{1} = 1$$

$$\sin \delta = \frac{1}{2} = 0.5$$

となる。

$$\cos \delta = \sqrt{1 - (\sin \delta)^2} = \sqrt{1 - 0.5^2} = 0.86603$$

となり、 $Q$  [p.u.] は、

$$\begin{aligned} Q &= \frac{VE \cos \delta - V^2}{X_S} \\ &= \frac{1 \times 2 \times 0.86603 - 1^2}{2} = 0.36606 \rightarrow 0.366 \text{ p.u.} \quad \dots \text{(答)} \end{aligned}$$

となる。

$$VI = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{0.5^2 + 0.36603^2} = 0.61966 \text{ p.u.}$$

$$I = \frac{0.61966}{1} = 0.61966 \rightarrow 0.620 \text{ p.u.} \quad \dots \text{(答)}$$

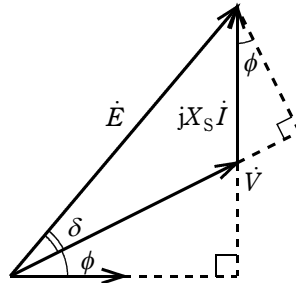
となる。

$P = 0.5 \text{ p.u.}$  から、力率角を  $\phi$  として、

$$\cos \phi = \frac{P}{VI} = \frac{0.5}{1.0 \times 0.61966} = 0.80689 \rightarrow 0.807 \dots \text{ (答)}$$

[別解]  $P$  及び  $Q$  の式の導出に関して別解を示す。

円筒形同期発電機のフェーザ図を以下に示す。



(2)

$$P = VI \cos \phi$$

$$E \sin \delta = X_S I \cos \phi$$

$$I \cos \phi = \frac{E \sin \delta}{X_S}$$

上式から、有効電力  $P$  [p.u.] は

$$P = \frac{VE \sin \delta}{X_S} \dots \text{ (答)}$$

となる。

(3)

$$Q = VI \sin \phi$$

$$E \cos \delta = V + X_S I \sin \phi$$

$$I \sin \phi = \frac{E \cos \delta - V}{X_S}$$

上式から、無効電力  $Q$  [p.u.] は

$$Q = \frac{VE \cos \delta - V^2}{X_S} \dots \text{ (答)}$$

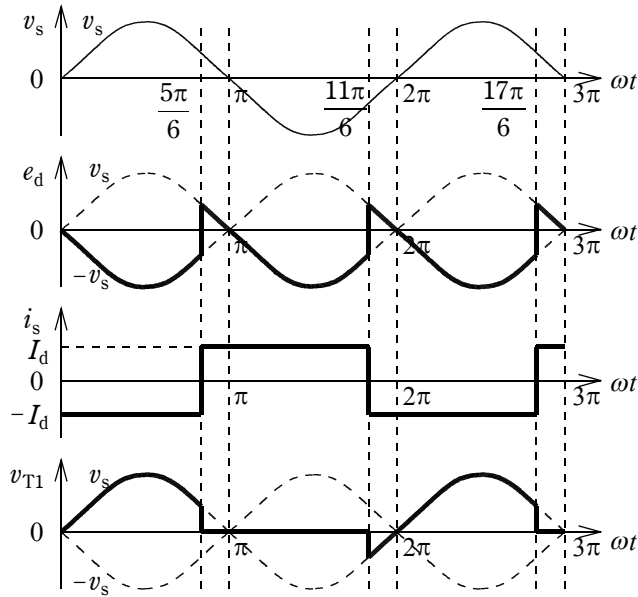
となる。

[問3の標準解答]

- (1) 交流電源電圧  $v_s = \sqrt{2}V \sin \omega t$  , 制御角  $\alpha$  で運転しているときの直流電圧  $e_d$  の平均値  $E_d$  は,  $\omega t = \theta$  とすると,

$$\begin{aligned} E_d &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} e_d d\theta = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\alpha+\pi} v_s d\theta = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\alpha+\pi} (\sqrt{2}V \sin \theta) d\theta = -\frac{\sqrt{2}V}{\pi} [\cos \theta]_{\alpha}^{\alpha+\pi} \\ &= -\frac{\sqrt{2}V}{\pi} [\cos(\alpha + \pi) - \cos \alpha] \\ &= \frac{2\sqrt{2}V}{\pi} \cos \alpha \doteq 0.90V \cos \alpha \quad \dots \text{(答)} \end{aligned}$$

- (2) 制御角  $\alpha = 150^\circ$  , 直流電流  $i_d = I_d$  で運転しているとき, 交流電源電圧  $v_s$  に対して, 直流電圧  $e_d$  , 交流電流  $i_s$  , 及びサイリスタ  $T_1$  に印加される電圧  $v_{T1}$  の波形は下図となる。



- (3) 制御角  $\alpha = 150^\circ$  のとき, サイリスタの転流余裕角  $\gamma$  [ $^\circ$ ] は,

$$\gamma = 180 - \alpha = 180 - 150 = 30 \quad \dots \text{(答)}$$

また, 逆バイアス時間 (ホールドオフ期間)  $t_{\text{off}}$  [s] はこの転流余裕角  $\gamma$  [ $^\circ$ ] に相当する時間であり,  $f = 50 \text{ Hz}$  の 1 サイクルは  $20 \text{ ms}$  であるので,  $t_{\text{off}}$  [s] は,

$$t_{\text{off}} = 20 \times \frac{30}{360} = \frac{5}{3} = 1.6667 \rightarrow 1.67 \text{ ms} \quad \dots \text{ (答)}$$

(4) 電池の電圧は、直流電圧平均値の絶対値  $|E_d|$  に等しい。

$$|E_d| = \left| \frac{2\sqrt{2}V}{\pi} \cos \alpha \right| = \left| \frac{2\sqrt{2} \times 200}{\pi} \cos 150^\circ \right| = \left| \frac{2\sqrt{2} \times 200}{\pi} \times \left( -\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \right|$$

$$= 155.94 \text{ V}$$

途中の損失はないので、上記の直流電圧と直流電流  $I_d = 100 \text{ A}$  の積の直流電力が交流電源に送る有効電力  $P$  [W] に等しい。

$$P = |E_d| I_d = 155.94 \times 100 = 15594 \rightarrow 15600 \text{ W} \quad \dots \text{ (答)}$$

交流側の有効電力は、正弦波の交流電圧実効値と交流電流  $i_s$  の基本波実効値  $I_f$  [A] と力率の積となる。力率は上記(2)の波形から  $\cos \alpha = \cos 150^\circ$  であるので、

$$I_f = \frac{P}{V|\cos \alpha|} = \frac{15594}{200 \times \left( -\frac{\sqrt{3}}{2} \right)} = 90.031 \rightarrow 90.0 \text{ A} \quad \dots \text{ (答)}$$

なお、 $180^\circ$  通電の方形波をフーリエ級数展開すると、基本波の実効値成分が同じ  $I_f = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} I_d$  となる。

(5) 交流電源に送る有効電力を2倍に増加させるためには、制御角  $\alpha = 150^\circ$  で  $I_d = 100 \text{ A}$  の定常状態から、 $\alpha$  を  $150^\circ$  より小さくして  $I_d = 200 \text{ A}$  に向かって増加させ、 $I_d = 200 \text{ A}$  になるときに  $\alpha$  が  $150^\circ$  に戻るように制御すればよい。

電池の電圧は一定である。直流電流を増加させる前後の定常状態において、他励インバータの直流電圧は同じなので、同じ制御角で運転することになる。直流電流を増加させる期間は、他励インバータの負の直流電圧を小さくする（「小さくする」意味は、負の  $0 \text{ V}$  又は正の電圧の方向に変化させる）。これによって、電池の電圧と他励インバータの直流電圧に差が生じて、直流リアクトルに印加される、この差電圧の電圧時間積で直流電流が増加する。

[問4の標準解答]

(1) 次式のようになる。

$$\frac{dx(t)}{dt} = \begin{pmatrix} -4 & -6 \\ 3 & 5 \end{pmatrix} x(t) + \begin{pmatrix} -2 \\ 3 \end{pmatrix} u(t)$$

$$\text{よって } A = \begin{pmatrix} -4 & -6 \\ 3 & 5 \end{pmatrix} \quad \dots \text{ (答)}$$
$$b = \begin{pmatrix} -2 \\ 3 \end{pmatrix}$$

(2) 特性多項式は次式で与えられる。

$$\det(sI - A) = \begin{vmatrix} s+4 & 6 \\ -3 & s-5 \end{vmatrix} = s^2 - s - 2$$

特性方程式

$$s^2 - s - 2 = 0$$

を解いて、特性根は-1, 2と求められる。正の特性根があるので、このシステムは不安定である。 … (答)

(3) 可制御性行列  $U_c = [b \quad Ab]$  を計算する。

$$Ab = \begin{pmatrix} -4 & -6 \\ 3 & 5 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -2 \\ 3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -10 \\ 9 \end{pmatrix}$$

であるから、

$$U_c = [b \quad Ab] = \begin{pmatrix} -2 & -10 \\ 3 & 9 \end{pmatrix}$$

となる。

$$\therefore |U_c| = \begin{vmatrix} -2 & -10 \\ 3 & 9 \end{vmatrix} = 12 \neq 0$$

よって、このシステムは可制御である。 … (答)

(4) まず,  $A - bf$  を計算する。

$$A - bf = \begin{pmatrix} -4 & -6 \\ 3 & 5 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} -2 \\ 3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f_1 & f_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -4 + 2f_1 & -6 + 2f_2 \\ 3 - 3f_1 & 5 - 3f_2 \end{pmatrix}$$

したがって, フィードバック制御系の特性多項式は

$$\begin{aligned} \det[sI - (A - bf)] &= \begin{vmatrix} s + 4 - 2f_1 & 6 - 2f_2 \\ -3 + 3f_1 & s - 5 + 3f_2 \end{vmatrix} \\ &= s^2 + (-2f_1 + 3f_2 - 1)s + (-8f_1 + 6f_2 - 2) \cdots \cdots \cdots \textcircled{1} \end{aligned}$$

となる。  $\cdots$  (答)

(5)  $-2 \pm j$  を根とする特性多項式は次式である。

$$(s + 2 - j)(s + 2 + j) = s^2 + 4s + 5 \cdots \cdots \cdots \textcircled{2}$$

①式が②式になればよいのだから, 係数比較法によって,  $f_1$  及び  $f_2$  に関する連立方程式

$$\begin{aligned} -2f_1 + 3f_2 - 1 &= 4 \\ -8f_1 + 6f_2 - 2 &= 5 \end{aligned}$$

が成立する。これを解いて,

$$f_1 = \frac{3}{4}, \quad f_2 = \frac{13}{6} \cdots \cdots \text{(答)}$$

を得る。