●平成14年度第二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) 自己励磁現象

無励磁で定格速度で運転している同期発電機に、無負荷の送電線などの容量性負荷を接続した場合、残留磁気による電圧が進み電流を生じさせ、電機子反作用の磁化作用により、この電流がさらに端子電圧を高めて進み電流を増加させ、端子電圧はある極限値に達して安定する。この現象を同期発電機の容量性負荷に対する自己励磁現象という。

自己励磁現象による発電機端子電圧の上昇値は、発電機の無負荷飽和曲線と容量負荷充電特性から決まる。この電圧が定格電圧より非常に高ければ絶縁破壊を起こすおそれがある。

(2) 送電線路の試充電において、自己励磁による異常現象を起こさない方策

（下記方策のうち三つ挙げればよい。）

① 発電機に短絡比の大きいものを使用する。

② 受電端に誘導性負荷(分路リアクトル、無負荷の変圧器など)を接続する。

③ 受電端に同期調相機を接続し、低励磁(遅れ)運転をする。

④ 発電機に自動電圧調整器を使用して、電圧を制御する。

⑤ 複数の発電機に充電電流を分担させる。

〔問２の標準解答〕

(1) タービン及び発電機の軸構成の概要

　タービンを二つの軸構成に分け、一方の軸を高圧タービンと低圧タービンの組合せ、他方の軸を中圧タービンと低圧タービンの組合せとし、それぞれの軸に発電機を結合して、2 台の発電機を発電機主母線で並列して運転する方式である。

（軸構成別解）

　軸構成は、一方の軸を高圧タービンと中圧タービンの組合せとし、他方の軸を 2 台の低圧タービンの組合せとする。

(2) 他の方式と比較しての特徴

・タービン・発電機軸の全長を短かくすることができるため、軸系の設計や運転が容易である。

・それぞれの発電機出力を小さくできるため、大容量発電ユニットの設計や製作が容易である。

・発電機固定子を小さくできるため、それぞれの重量が軽くなり、据付けが容易になる。

・2 軸構成となるので、タービン・発電機の制御装置や付属機器が複雑となり、また、建設・保守コストが高くなる。

(3) タービン・発電機の始動方法

　タービン始動前のターニング運転中に両方の発電機に励磁を加え、発電機主母線を経て同期させてから、高圧タ-ビンに蒸気を通し始動する。その後、定格速度まで昇速し、発電機を系統に並列する。

（始動方法別解）

　両軸のタービンに別々に蒸気を通して始動し、定格速度の約 1 ／2 において両方の発電機に励磁を加え、発電機主母線を経て同期させる。その後定格速度まで昇速し、発電機を系統に並列する。

〔問３の標準解答〕

(1) ケーブルの充電電流を表す式は、

$$I_C = \frac{2\pi f C V l}{\sqrt{3}} \text{〔kA〕}$$

(2) 臨界こう長を $l_{\max}$ 、許容電流を I_m とすると、$I_m = I_C$ なので、

$$l_{\max} = \frac{\sqrt{3} I_m}{2\pi f C V}$$ となる。

この式に具体的な数値を代入すると、

$$l_{\max} = \frac{\sqrt{3} \times 1.03}{2\pi \times 50 \times 0.5 \times 10^{-6} \times 154} = 73.749 \rightarrow 73.7 \text{〔km〕}$$ となる。

(3) 負荷に供給された有効電力 P_0 は、

$P_0 = \sqrt{3} V I_0 \cos\theta$ 、 $\cos\theta = 1$ より、

$P_0 = \sqrt{3} V I_0$ で与えられる。

一方、このケーブルの送電端から流れ込む電流を I_m 、ケーブルの充電電流を I_C 、負荷に流れる電流を I_0 とすると、 $\dot{I}_C$ と $\dot{I}_0$ は 90 度の位相差を持ち、次式が成り立つ。

$\dot{I}_m = \dot{I}_c + \dot{I}_0$ よって、 $I_m{}^2 = I_c{}^2 + I_0{}^2$

が成立する。また、問題文より、

$I_m = 1.03$〔kA〕

$$I_c = \frac{2\pi f C V l}{\sqrt{3}} = \frac{2\pi \times 50 \times 0.5 \times 10^{-6} \times 154 \times 43}{\sqrt{3}} = 0.60055 \text{〔kA〕}$$

$\therefore \ |I_0| = \sqrt{(1.03)^2 - (0.60055)^2} = 0.83678$〔kA〕

$V = 154$〔kV〕より、

$P_0 = \sqrt{3} V I_0 = \sqrt{3} \times 154 \times 0.83678 = 223.20 \rightarrow 223$〔MW〕となる。

〔問４の標準解答〕

(1) 塩害が電力設備に及ぼす影響

台風や強風時に発生した大量の海塩粒子が、風によって送られて電力設備に付着し、これに適量の水分が補給されると絶縁抵抗が低下し部分的な沿面放電が発生する。

この状態が継続するとそれが原因となって電力設備の絶縁破壊を誘発し、電力系統の停電事故を招くことがある。

送電線のがいし等の設備に悪影響を及ぼし、発変電所の母線のがいし、遮断器、断路器、計器用変成器のブッシング、ケーブルヘッドのがいし類にも塩害が多く発生する。配電線では、塩害によりがいしの破損、柱上機器のがいし・ブッシングの破損、電線被覆のトラッキング等の被害がある。

(2) 塩害による電力設備の被害を減少させるための対策

① 場所の選定

設備の立地やルートの選定には、塩分の付着しにくい気象条件の場所に留意する。

② 懸垂がいしの増結又は耐塩がいし等の使用

懸垂がいしの個数を増加するなど絶縁を強化する。

耐塩がいし、長幹がいし、耐霧がいし、耐霧長幹がいしを使用する。

③ がいしの洗浄

がいし洗浄装置で洗浄、変電所等では活線洗浄を行う。洗浄水の固有抵抗に注意（5kΩ - cm 以上）

④ シリコンコンパウンドの塗布

がいし表面にシリコンコンパウンドを塗る。はっ水性及びアミーバ作用によって降雨期又は霧中でも表面漏れ抵抗はあまり低下しない。

⑤ 機器のいんぺい化

機器の配置を屋内式又は地下式、キュービクル式とする。

⑥ ガス絶縁化

充電部を SF_6 ガスで封じ込めて絶縁したガス絶縁開閉装置（GIS）、ガス絶縁母線（GIB）を採用する。

〔問５の標準解答〕

(A) 電圧低下を防止するため、力率を原則として 85〔%〕以上とするとともに、系統側からみて進み力率（又は発電設備側からみて遅れ力率）にならないようにする。

(B) 転送遮断装置

(C) 逆電力リレー（又は逆電力継電器）

(D) 自動同期検定装置

(E) 瞬時電圧低下により、系統の電圧が適正値を逸脱するおそれがあるときは、限流リアクトル等を設置する。

(F) 限流リアクトル

(G) 異なる変電所バンク系統への連系、上位電圧の電線路への連系その他の短絡容量対策を行う。

〔問６の標準解答〕

(1) 表中の空欄の計算

・負荷電力量

$$A: 250\times 4 = 1{,}000〔kW\cdot h〕$$

$$B: 200\times 7 = 1{,}400〔kW\cdot h〕$$

$$C: 100\times 2 = 200〔kW\cdot h〕$$

$$D: 50\times 11 = 550〔kW\cdot h〕$$

・負荷損電力量

$$E: 4.8\times\left(\frac{250}{0.9}\times\frac{1}{300}\right)^2\times 4 = 16.461〔kW\cdot h〕\rightarrow 16.46〔kW\cdot h〕$$

$$F: 4.8\times\left(\frac{200}{0.8}\times\frac{1}{300}\right)^2\times 7 = 23.333〔kW\cdot h〕\rightarrow 23.33〔kW\cdot h〕$$

$$G: 4.8\times\left(\frac{100}{0.8}\times\frac{1}{300}\right)^2\times 2 = 1.667〔kW\cdot h〕\rightarrow 1.667〔kW\cdot h〕$$

$$H: 4.8\times\left(\frac{50}{0.7}\times\frac{1}{300}\right)^2\times 11 = 2.993〔kW\cdot h〕\rightarrow 2.993〔kW\cdot h〕$$

(2) 力率改善前の全日効率

・1 日の負荷合計

$$1{,}000 + 1{,}400 + 200 + 550 = 3{,}150〔kW\cdot h〕$$

・1 日の負荷損合計

$$16.461 + 23.333 + 1.667 + 2.993 = 44.454〔kW\cdot h〕$$

・全日効率 η_d

$$\eta_d = \frac{1日の負荷〔kW\cdot h〕}{1日の負荷〔kW\cdot h〕+無負荷損〔kW\cdot h〕\times 24 + 1日の負荷損〔kW\cdot h〕}$$

$$= \frac{3{,}150}{3{,}150 + 0.9\times 24 + 44.454} = 0.97946 \quad\rightarrow\quad 97.95〔\%〕$$

(3) 力率改善後の全日効率

・力率改善後の負荷損

250kW 負荷時： $4.8 \times \left(\dfrac{250}{300} \right)^2 \times 4 = 13.333$〔kW·h〕

200kW 負荷時： $4.8 \times \left(\dfrac{200}{300} \right)^2 \times 7 = 14.933$〔kW·h〕

1日の負荷損合計： $13.333 + 14.933 + 1.667 + 2.993 = 32.926$〔kW·h〕

・全日効率 η_d

$$\eta_d = \frac{3{,}150}{3{,}150 + 0.9 \times 24 + 32.926} = 0.98298 \quad \rightarrow \quad 98.30 \text{〔\%〕}$$

＜機械・制御科目＞

〔問１の標準解答〕

（1）正しい。

（2）誤りである。

(理由)

トルクは電源電圧の 2 乗及び二次巻線の抵抗に比例し、インピーダンスの 2 乗に反比例する式となる。

（3）正しい。

（4）誤りである。

(理由)

最大トルク、誘導起電力及び一次周波数の間には

最大トルク∝(誘導起電力／一次周波数)^2

の関係が成り立つ。題意の周波数変化の範囲では、端子電圧は誘導起電力とほぼ等しいと見なせる。

したがって、一次周波数(電源周波数)が 60〔Hz〕から 50〔Hz〕に変わっても、最大トルクをほぼ同じ値に保つためには、端子電圧を 60〔Hz〕時の値から $\left(\frac{50}{60}\right)$ を乗じた値に低下させる必要がある。

（5）誤りである。

(理由)

電源電圧、ギャップ磁束及び一次周波数の間には

ギャップ磁束∝(電源電圧／一次周波数)

の関係が成り立つので、電源電圧が一定のとき周波数が低下すれば、ギャップ磁束は反比例して増加する。

〔問２の標準解答〕

（1）500〔kV･A〕変圧器２台の並行運転時

ａ．変圧器１台当たりの全損失

350 kV･A/台　運転時の全損失 P_{L51} は、500〔kV･A〕変圧器の無負荷損を P_{5i}、負荷損を P_{5c} とすれば、

$$P_{L51} = P_{5i} + P_{5c}\left(\frac{350}{500}\right)^2 = 1.28 + 7.35 \times \left(\frac{350}{500}\right)^2$$
$$= 4.8815 \ \rightarrow \ 4.88 \text{〔kW〕} \quad \cdots\cdots \quad ①$$

ｂ．最終温度上昇値

定格運転時の全損失 P_{L5} は、

$$P_{L5} = P_{5i} + P_{5c} = 1.28 + 7.35 = 8.63 \text{〔kW〕} \quad \cdots\cdots \quad ②$$

である。最終温度上昇値 T_{u51} は発熱量すなわち全損失に比例するから、

$$T_{u51} = 50 \times \frac{P_{L51}}{P_{L5}} = 50 \times \frac{4.8815}{8.63} = 28.282 \ \rightarrow \ 28.3 \text{〔K〕} \quad \cdots\cdots \quad ③$$

（2）500〔kV･A〕及び 300〔kV･A〕変圧器並行運転時負荷分担

300〔kV･A〕変圧器のインピーダンスを 500〔kV･A〕基準に換算して Z_3' とすると

$$Z_3' = 4 \times \frac{500}{300} = 6.6666 \text{〔\%〕} \quad \cdots\cdots \quad ④$$

500〔kV･A〕変圧器の負荷分担 P_5 は、500〔kV･A〕変圧器のインピーダンスを Z_5 とすれば、

$$P_5 = 700 \times \frac{Z_3'}{Z_5 + Z_3'} = 700 \times \frac{6.6666}{3 + 6.6666} = 482.75 \ \rightarrow \ 483 \text{〔kW〕} \quad \cdots\cdots \quad ⑤$$

300〔kV･A〕変圧器の負荷分担 P_3 は、

$$P_3 = 700 \times \frac{Z_5}{Z_5 + Z_3'} = 700 \times \frac{3}{3 + 6.6666} = 217.24 \ \rightarrow \ 217 \text{〔kW〕} \quad \cdots\cdots \quad ⑥$$

（または、P_3 ＝ 700－483 ＝ 217〔kW〕）

(3) 500〔kV･A〕及び 300〔kV･A〕変圧器並行運転時の全損失と最終温度上昇値

ａ. 500〔kV･A〕変圧器

483〔kV･A〕運転時の全損失 P_{L52} は、

$$P_{L52} = P_{5i} + P_{5c}\left(\frac{P_5}{500}\right)^2 = 1.28 + 7.35 \times \left(\frac{482.75}{500}\right)^2$$

$$= 8.1315 \rightarrow 8.13〔\mathrm{kW}〕 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad ⑦$$

である。500〔kV･A〕変圧器の定格運転時の全損失は②式により 8.63〔kW〕であり、最終温度上昇値 T_{u52} は全損失に比例するから

$$T_{u52} = 50 \times \frac{P_{L52}}{P_{L5}} = 50 \times \frac{8.1315}{8.63} = 47.111 \rightarrow 47.1〔\mathrm{K}〕 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots \quad ⑧$$

ｂ. 300〔kV･A〕変圧器

217〔kV･A〕運転時の全損失 P_{L32} は、

$$P_{L32} = P_{3i} + P_{3c}\left(\frac{P_3}{300}\right)^2 = 0.92 + 4.8 \times \left(\frac{217.24}{300}\right)^2$$

$$= 3.4369 \rightarrow 3.44〔\mathrm{kW}〕 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad ⑨$$

であり、300〔kV･A〕変圧器の定格運転時の全損失 P_{L3} は、

$$P_{L3} = P_{3i} + P_{3c} = 0.92 + 4.8 = 5.72〔\mathrm{kW}〕 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad ⑩$$

であるので、最終温度上昇値 T_{u32} は、

$$T_{u32} = 50 \times \frac{P_{L32}}{P_{L3}} = 50 \times \frac{3.4369}{5.72} = 30.042 \rightarrow 30.0〔\mathrm{K}〕 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots \quad ⑪$$

〔問３の標準解答〕

（1）負荷電圧の実効値 V_o

$$V_o=\sqrt{\frac{2}{2\pi}\int_{\alpha}^{\pi}\left(\sqrt{2}V_i\sin\omega t\right)^2 \mathrm{d}(\omega t)}$$

$$=\sqrt{\frac{V_i^{\,2}}{\pi}\int_{\alpha}^{\pi}(1-\cos 2\omega t)\mathrm{d}(\omega t)}=\sqrt{\frac{V_i^{\,2}}{\pi}\left\{\left[\omega t\right]_{\alpha}^{\pi}-\left[\frac{\sin 2\omega t}{2}\right]_{\alpha}^{\pi}\right\}}$$

$$=V_i\sqrt{\frac{1}{\pi}\left(\pi-\alpha+\frac{\sin 2\alpha}{2}\right)} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \ ①$$

（2）入力力率 $\cos\phi$

I_i を入力電流、I_o を出力電流とすれば、サイリスタでの損失は無視できるから次式が成立する。

入力電力 P_i ＝出力電力 P_o ＝ V_oI_o

入力皮相電力 S ＝ V_iI_i ＝ V_iI_o

したがって、

$$\cos\phi=\frac{P_i}{S}=\frac{V_o}{V_i}=\sqrt{\frac{1}{\pi}\left(\pi-\alpha+\frac{\sin 2\alpha}{2}\right)} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \ ②$$

（3）サイリスタ $\mathrm{T_1}$ の電流の平均値 $\bar{I}_T$

$$\bar{I}_T=\frac{1}{2\pi R}\int_{\alpha}^{\pi}\sqrt{2}V_i\sin\omega t\,\mathrm{d}(\omega t)=\frac{\sqrt{2}V_i}{2\pi R}\left[-\cos\omega t\right]_{\alpha}^{\pi}$$

$$=\frac{V_i}{\sqrt{2}\pi R}(\cos\alpha+1) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \ ③$$

（4）負荷電圧の平均値 $\bar{V}_o$

$$\bar{V}_o=\frac{1}{2\pi}\left\{\int_{\alpha}^{\pi}\sqrt{2}V_i\sin\omega t\,\mathrm{d}(\omega t)+\int_{\pi}^{2\pi}\sqrt{2}V_i\sin\omega t\,\mathrm{d}(\omega t)\right\}$$

$$=\frac{\sqrt{2}V_i}{2\pi}\left\{\left[-\cos\omega t\right]_{\alpha}^{\pi}+\left[-\cos\omega t\right]_{\pi}^{2\pi}\right\}=\frac{V_i}{\sqrt{2}\pi}(\cos\alpha-1) \quad \cdots\cdots\cdots \ ④$$

（別解）

$$\bar{V}_o=\frac{1}{2\pi}\int_{\alpha}^{2\pi}\sqrt{2}V_i\sin\omega t\,\mathrm{d}(\omega t)=\frac{\sqrt{2}V_i}{2\pi}\left[-\cos\omega t\right]_{\alpha}^{2\pi}=\frac{V_i}{\sqrt{2}\pi}(\cos\alpha-1) \quad \cdots\cdots\cdots \ ④'$$

〔問４の標準解答〕

（1）固有角周波数 ω_n 及び減衰係数 ζ

閉ループ伝達関数

$$\frac{C(s)}{R(s)}=\frac{\dfrac{K}{s(Ts+1)}}{1+\dfrac{K}{s(Ts+1)}}=\frac{\dfrac{K}{T}}{s^2+\dfrac{s}{T}+\dfrac{K}{T}}=\frac{{\omega_n}^2}{s^2+2\zeta\omega_n s+{\omega_n}^2} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots ①$$

①式の s についての係数を比較することにより、次の関係が得られる。

$$\frac{K}{T}={\omega_n}^2 \ 、\ \frac{1}{T}=2\zeta\omega_n$$

したがって、

$$\omega_n=\sqrt{\frac{K}{T}} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots ②$$

$$\zeta=\frac{1}{2\omega_n T}=\frac{1}{2\sqrt{KT}} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots ③$$

（2）ゲイン

時定数 T は一定であるから、ζ ＝ 0.2 のときのゲインを K_2、ζ ＝ 0.6 のときのゲインを K_6 とおけば、次式が成立する。

$$0.2=\frac{1}{2\sqrt{K_2 T}} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots ④$$

$$0.6=\frac{1}{2\sqrt{K_6 T}} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots ⑤$$

④式と⑤式の比は、次のようになる。

$$\frac{0.6}{0.2}=3=\sqrt{\frac{K_2}{K_6}} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots ⑥$$

$$K_6=\frac{K_2}{9} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots ⑦$$

したがって、ゲインを 1／9 倍にすればよい。

(3) 固有角周波数

ζ = 0.2 のときの固有角周波数を ω_{n2}、ζ = 0.6 のときの固有角周波数を ω_{n6} とおけば、次式が成立する。

$$\frac{\omega_{n6}}{\omega_{n2}} = \sqrt{\frac{K_6}{K_2}} = \sqrt{\frac{1}{9}} \quad \cdots\cdots \text{⑧}$$

$$\omega_{n6} = \frac{\omega_{n2}}{3} \quad \cdots\cdots \text{⑨}$$

したがって、固有角周波数は1／3 倍になる。

(4) 過渡応答 $c(t)$

①式に、K 及び T の値を代入すると、伝達関数は次のようになる。

$$G(s) = \frac{100}{s^2 + 12s + 100} \quad \cdots\cdots \text{⑩}$$

単位ステップ応答は、次のようにして求められる。

$$c(t) = \mathcal{L}^{-1}\left[\frac{100}{s\left(s^2 + 12s + 100\right)}\right] \quad \cdots\cdots \text{⑪}$$

上式を部分分数に分けると

$$\frac{100}{s\left(s^2 + 12s + 100\right)} = \frac{k_0}{s} + \frac{k_1 s + k_2}{s^2 + 12s + 100} \quad \cdots\cdots \text{⑫}$$

両辺の分母を払い、整理すると、

$$(k_0 + k_1)s^2 + (12k_0 + k_2)\,s + 100k_0 = 100 \quad \cdots\cdots \text{⑬}$$

これより、k_0 = 1、k_1 =－1、k_2 =－12 が得られる。

したがって、

$$c(t) = \mathcal{L}^{-1}\left[\frac{1}{s} - \frac{s+12}{s^2 + 12s + 100}\right] = \mathcal{L}^{-1}\left[\frac{1}{s} - \frac{(s+6) + (6/8)\cdot 8}{(s+6)^2 + 8^2}\right] \quad \cdots\cdots \text{⑭}$$

ラプラス逆変換の公式より

$$c(t) = 1 - e^{-6t}\left(\cos 8t + \frac{3}{4}\sin 8t\right) \quad \cdots\cdots \text{⑮}$$

$$\left(= 1 - 1.25e^{-6t} \sin\left(8t + \tan^{-1}\left(\frac{4}{3}\right)\right) \right)$$

が得られる。