令和元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) $W=\left(\tau+\dfrac{t}{2}\right)\times P\times 1000\,[\mathrm{J}]$ ・・・(答)

(2) $W=\dfrac{1}{2}\times I\times\left(\dfrac{2\pi N_{\mathrm{max}}}{60}\right)^2-\dfrac{1}{2}\times I\times\left(\dfrac{2\pi N_{\mathrm{i}}}{60}\right)^2$

$$=\frac{\pi^2}{1\,800}\times I\times\left(N_{\mathrm{max}}{}^2-N_{\mathrm{i}}{}^2\right)\qquad\cdots(答)$$

$$=\frac{\pi^2}{1\,800}\times I\times\left(N_{\mathrm{max}}+N_{\mathrm{i}}\right)\times\left(N_{\mathrm{max}}-N_{\mathrm{i}}\right)[\mathrm{J}]$$

(3) 題意より小問(1)及び小問(2)で求めたエネルギーは等しいことから，

$$\left(\tau+\frac{t}{2}\right)\times P\times 1000=\frac{1}{2}\times I\times\left(\frac{2\pi}{60}\right)^2\times\left(N_{\mathrm{max}}{}^2-N_{\mathrm{i}}{}^2\right)$$

$$\frac{(2\tau+t)\times P\times 1000\times 60^2}{4\pi^2\times I}=N_{\mathrm{max}}{}^2-N_{\mathrm{i}}{}^2\quad\cdots\cdots\cdots\cdots\ ①$$

一方，速度変動率 δ_{N} は，$\delta_{\mathrm{N}}=\dfrac{\left(N_{\mathrm{max}}-N_{\mathrm{i}}\right)}{N}\times 100\,[\%]$ として表される。

①式より，

$$N_{\mathrm{max}}-N_{\mathrm{i}}=\frac{(2\tau+t)\times P\times 1000\times 60^2}{4\pi^2\times I\times\left(N_{\mathrm{max}}+N_{\mathrm{i}}\right)}$$

$N\fallingdotseq N_{\mathrm{i}}$，$N_{\mathrm{max}}+N_{\mathrm{i}}\fallingdotseq 2N$ であるから，δ_{N} は，

$$\delta_{\mathrm{N}}\fallingdotseq\frac{(2\tau+t)\times P\times 1000\times 60^2}{4\pi^2\times I\times 2N^2}\times 100\,[\%]$$

$$\delta_{\mathrm{N}} \fallingdotseq \frac{3600\times(2\tau+t)\times P\times10^5}{4\pi^2\times I\times 2N^2}$$

$$\fallingdotseq \frac{45.594\times(2\tau+t)\times P\times10^5}{I\times N^2}$$

$$\fallingdotseq \frac{45.6\times(2\tau+t)\times P\times10^5}{I\times N^2}\quad [\%]$$ ・・・(答)

(4) t=3, τ=0.5 で 25 %負荷のとき $\delta_{\mathrm{N}}=2$ %であることから,

$$\frac{(2\times0.5+3)\times0.25\times P_{100}\times45.594\times10^5}{I\times N^2}=2 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad ②$$

が得られる。

$\dfrac{45.594\times10^5}{I\times N^2}$ は一定であるので,これを X とすると,②式より,

$$X=\frac{2}{4\times0.25\times P_{100}}$$

が得られる。題意より,

$t'=4$ 秒とし,出力は 100 %出力であることから,$\delta_{\mathrm{N}}{}'$ は,

$$\delta_{\mathrm{N}}{}'=(2\times0.5+4)\times1.0\times P_{100}\times X$$

となる。したがって,

$$\delta_{\mathrm{N}}{}'=5\times P_{100}\times\frac{2}{4\times0.25\times P_{100}}=10\ \%$$ ・・・(答)

〔問2の標準解答〕

(1) 以下の中から3項目記載されていればよい。

・短絡:巻線の層間短絡

・地絡:巻線と鉄心間の地絡

・混触:高圧巻線と低圧巻線の混触

・断線:巻線の断線

(2)

・流動帯電は，大容量の導油式変圧器において，冷却のために絶縁油を循環させる際の摩擦により，固体絶縁物が負電荷の，絶縁油が正電荷の静電気で帯電する現象である。静電気の蓄積が絶縁油の耐圧値を超えると静電気放電が発生し，これが進展すると変圧器の絶縁破壊に至る。防止策として，絶縁油の流速を抑える，流動帯電抑止剤を絶縁油に添加する，などの対策がとられる。

(3)

・機械式保護リレー：衝撃圧力リレーは，事故時に変圧器内部で発生する分解ガスによる内圧上昇を検出する。内圧上昇が速いほど早く検出することができる。(別解：ブッフホルツリレーは，事故によるガスの発生や油流増大を検出する。ただし，地震により誤動作する場合があるので，警報用とするなど注意を要する。)

・電気式保護リレー：比率差動リレーは，変圧器一次・二次の電流の換算値の差を常に比較し，小さい場合は正常，整定値より大きい場合は内部事故として検出する。差電流を動作量，通過電流を抑制量として比率特性を持たせることで，検出感度と誤動作防止に優れている。

(4)

・油中ガス分析は，変圧器の絶縁油を採油し，溶解している可燃性ガスをクロマトグラフによって測定することにより，内部状態を診断する方法である。変圧器の内部に異常が発生すると，高温により絶縁油や絶縁紙が油中ガスとして熱分解し，アセチレンなどのガスが発生する。そこで，油中ガス分析によって検出したガスの種類・発生量や，複数種類のガスの成分比を基準値と比較することにより，変圧器内部の異常の有無や様相を判定する。

(5) 以下の中から 2 項目記載されていればよい。

・消火対策：変圧器に火災が発生した場合に早期に消火するため，水噴霧などの固定消火装置や大形消火器を変圧器の周辺に設置し，火災発生時は自動的に起動する。

・類焼防止対策：火災が発生した変圧器から，隣接する変圧器などへの類焼を

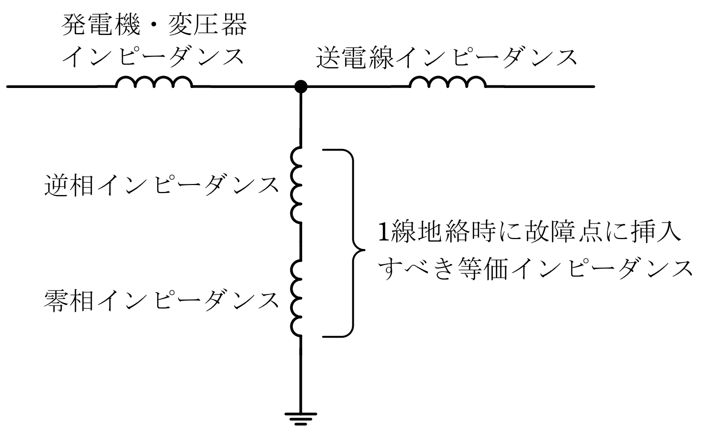
防止するため，防火壁や防火水幕を設ける。

・公害防止対策：変圧器事故による油流出や，変圧器火災の消火のための消火水が，変電所構外へ流出することを防止するため，油水流出防止せきや排油水槽を設ける。

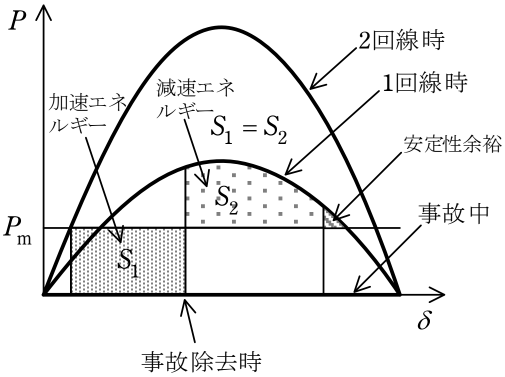
〔問３の標準解答〕

(1) 1 線地絡の場合，事故中の正相分等価回路では，事故点インピーダンスとして事故点から見た逆相及び零相インピーダンスが挿入される。一方，3 線地絡時には，等価回路では事故点は短絡される。このため事故中における事故点の正相電圧の大きさは，3 線地絡時より 1 線地絡時の方が大きくなる。これにより 1 線地絡時の方が，事故中の発電機の送電電力が大きくなり，発電機の加速が抑制されるため，過渡安定性面から見た過酷度合いは小さくなる。

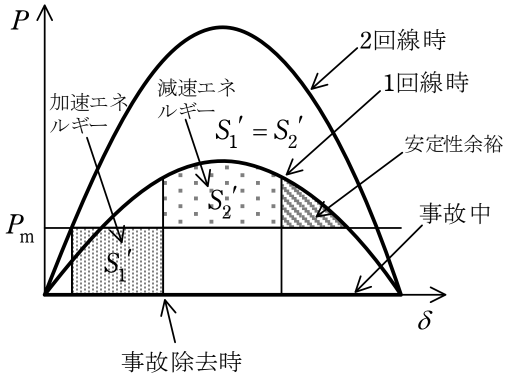
［参考図］



(2) 図のように，事故除去時間が短くできれば，加速エネルギーを小さくでき，これが安定性余裕の増大につながる。($S_1 > S_1'$)



(a) 基準ケース



(b) 高速事故除去のケース

(3)

［目的］

速応励磁を用いた場合，発電機の第 1 波動揺の抑制には効果があるが，第 2 波以降の減衰が悪化する場合がある。PSS はこの減衰を改善することを目的とする。

［基本機能］

PSS は，発電機出力，発電機回転数などを入力信号とし，対象とする動揺周期に対し発電機加速（減速）時には励磁を強める（弱める）ように位相と大きさを調整し，動揺を抑制するための自動電圧調整装置（AVR）への補助信号を生成する。

〔問４の標準解答〕

（1） 受電端に流入する複素電力 $P_{\mathrm{i}}+\mathrm{j}Q_{\mathrm{i}}$ は，遅れ無効電力を正とすると，

$$P_{\mathrm{i}}+\mathrm{j}Q_{\mathrm{i}}=\dot{V}_{\mathrm{r}}\times\overline{\left(\frac{\dot{V}_{\mathrm{s}}-\dot{V}_{\mathrm{r}}}{\mathrm{j}x}\right)}=V_{\mathrm{r}}\mathrm{e}^{\mathrm{j}(-\delta)}\times\overline{\left(\frac{V_{\mathrm{s}}\mathrm{e}^{\mathrm{j}0}-V_{\mathrm{r}}\mathrm{e}^{\mathrm{j}(-\delta)}}{\mathrm{j}x}\right)}$$

$$=V_{\mathrm{r}}\left[\cos(-\delta)+\mathrm{j}\sin(-\delta)\right]\times\overline{\left\{\frac{V_{\mathrm{s}}(\cos 0+\mathrm{j}\sin 0)-V_{\mathrm{r}}\left[\cos(-\delta)+\mathrm{j}\sin(-\delta)\right]}{\mathrm{j}x}\right\}}$$

$$=V_{\mathrm{r}}(\cos\delta-\mathrm{j}\sin\delta)\times\frac{V_{\mathrm{s}}-V_{\mathrm{r}}(\cos\delta+\mathrm{j}\sin\delta)}{-\mathrm{j}x}$$

$$=\frac{V_{\mathrm{s}}V_{\mathrm{r}}(\cos\delta-\mathrm{j}\sin\delta)-V_{\mathrm{r}}^{2}}{-\mathrm{j}x}=\frac{V_{\mathrm{s}}V_{\mathrm{r}}}{x}\sin\delta+\mathrm{j}\frac{(V_{\mathrm{s}}\cos\delta-V_{\mathrm{r}})V_{\mathrm{r}}}{x}$$

これより，

$$Q_{\mathrm{i}}=\frac{(V_{\mathrm{s}}\cos\delta-V_{\mathrm{r}})V_{\mathrm{r}}}{x}\quad\cdots(\text{答})$$

（2） $Q_{\mathrm{r}}=Q_{\mathrm{i}}$ を満足する V_{r} を求めればよい。

$Q_{\mathrm{r}}=4V_{\mathrm{r}}-3$ [p.u.]を 600 MV･A の自己容量基準から 1 000 MV･A の系統容量基準に変換すると，$(4V_{\mathrm{r}}-3)\times\dfrac{600}{1000}$ [p.u.]となる。

$V_{\mathrm{s}}=1.0$，δ は十分に小さいので $\cos\delta\fallingdotseq 1.0$ として，

$$Q_{\mathrm{i}}=\frac{(V_{\mathrm{s}}\cos\delta-V_{\mathrm{r}})V_{\mathrm{r}}}{x}=\frac{(1.0-V_{\mathrm{r}})V_{\mathrm{r}}}{0.03}$$

$Q_{\mathrm{r}}=Q_{\mathrm{i}}$ から，

$$(4V_{\mathrm{r}}-3)\times\frac{600}{1000}=\frac{(1.0-V_{\mathrm{r}})V_{\mathrm{r}}}{0.03}$$

整理すると，$V_{\mathrm{r}}^{2}-0.928V_{\mathrm{r}}-0.054=0$

これを解くと，$V_{\mathrm{r}}=0.982\,93,\ -0.054\,93$

正の値をとって，$V_{\mathrm{r}}=0.983$ p.u.

$$Q_{\mathrm{r}}=(4\times 0.982\,93-3)\times\frac{600}{1\,000}=0.559\,03\ \text{p.u.}$$　よって，559 Mvar ･･･(答)

〔問５の標準解答〕

（1）①両母線電圧の同期を検定し，電圧の大きさの差，位相差が小さいことを確認する。（同期検定①を CB10 投入の直前としても可とする）

②LS11 を投入する。（LS12 を投入でも可とする）

③LS12 を投入する。（②を LS12 とした場合，LS11 を投入する）

④CB10 を投入する。

⑤LS1 を投入する。

⑥LS2 を開放する。

⑦CB10 を開放する。

⑧LS11 を開放する。（LS12 を開放でも可とする）

⑨LS12 を開放する。（⑧を LS12 とした場合，LS11 を開放する）

（2）$I_s = \dfrac{V}{\sqrt{3}\,x}$［A］，$S = \dfrac{V^2}{x}$［V·A］・・・(答)

（3）$\dot{I} = \dfrac{V\sin\theta}{\sqrt{3}x} - \mathrm{j}\dfrac{V\cos\theta - V_0}{\sqrt{3}x}$［A］・・・(答)

（4）$V_0 = V$ ならば，

$$|\dot{I}|^2 = \frac{V^2\sin^2\theta + V^2(\cos\theta - 1)^2}{3x^2} = \frac{2V^2}{3x^2}(1-\cos\theta) = \frac{4V^2}{3x^2}\sin^2\frac{\theta}{2}$$

$$\therefore |\dot{I}| = \frac{2V}{\sqrt{3}\,x}\left|\sin\frac{\theta}{2}\right| \fallingdotseq \frac{2V}{\sqrt{3}\,x}\cdot\frac{|\theta|}{2} = \frac{V}{\sqrt{3}\,x}\cdot|\theta| = I_s\cdot|\theta|$$ ［A］・・・(答)

〔問６の標準解答〕

(1) 佐久間周波数変換所，新信濃変電所，東清水変電所

(2) 以下の項目から，長所及び短所がそれぞれ３項目記載されていればよい。

（長所）

・充電電流がないため，ケーブルによる長距離の連系が可能である。

・位相角による安定度問題がないため，長距離大容量の連系が可能である。

・交流系統の短絡容量は連系によって増大しない。

・潮流を急速かつ自由に制御できる。

・交流系統の事故が他系統に波及しない。

・送電線の建設費用が同等の交流と比較して小さい。

（短所）

・変換設備の建設費用が大きい。

・交流の短絡容量が小さいと，電圧・高調波不安定，軸ねじれ振動の問題が発生する。

・多端子系統の構成では制御・保護が複雑となる。

・高調波や高周波対策が必要となる。

・交流のじょう乱で運転に影響を受ける。

・他励式の場合，送電電力に応じた無効電力補償装置が必要となる。

(3)

①(設備構成上の特徴) 2組の交直変換装置を1箇所に設置し交直変換装置同士が背中合わせとなるような設備構成(Back to Back)となっており，交直変換装置間に直流送電線がない。

②(技術的理由) 交流連系とした場合，一般送配電事業者 3 者間にまたがる交流ループ系統になり，常時の潮流制御が困難になるため。

＜機械・制御科目＞

〔問 1 の標準解答〕

(1) 電機子巻線の 1 相当たりの抵抗 r_1 は，

$$r_1 = \frac{0.92}{2} = 0.46\ \Omega$$

拘束試験時の電機子電流を I_{1s} とすれば，一次銅損 W_{1c} は，

$$W_{1c} = 3r_1 I_{1s}{}^2 = 3 \times 0.46 \times 31^2 = 1\,326.2\ \text{W}$$

拘束試験時の一次入力を P_{1s} とすると，拘束試験時の二次入力 P_{2s} は，

$$P_{2s} = P_{1s} - W_{1c} = 5.2 \times 10^3 - 1\,326.2 = 3\,873.8\ \text{W} \ \rightarrow\ 3.87\ \text{kW} \quad \cdots(\text{答})$$

(別解)

誘導電動機の一次抵抗を r_1 及び一次側換算の二次抵抗を $r_2{}'$ とすると，

$$r_1 + r_2{}' = \frac{P_{1s}}{3I_{1s}{}^2} = \frac{5\,200}{3 \times 31^2} = 1.803\,7\ \Omega$$

これより $r_2{}'$ は，

$$r_2{}' = 1.803\,7 - r_1 = 1.803\,7 - 0.46 = 1.343\,7\ \Omega$$

したがって，拘束試験時の二次入力 P_{2s} は，

$$P_{2s} = 3r_2{}' I_{1s}{}^2 = 3 \times 1.343\,7 \times 31^2 = 3\,873.9\ \text{W} \ \rightarrow\ 3.87\ \text{kW} \quad \cdots(\text{答})$$

(2) 始動時の二次入力は印加電圧の 2 乗に比例するので，定格電圧時の二次入力 P_2 は，

$$P_2 = P_{2s}\left(\frac{3\,000}{610}\right)^2 = 3\,873.8 \times \left(\frac{3\,000}{610}\right)^2 = 93\,696\ \text{W} \ \rightarrow\ 93.7\ \text{kW} \quad \cdots(\text{答})$$

(別解)

拘束試験時のインピーダンスを Z_s とすると，

$$Z_s=\frac{\frac{V_{1s}}{\sqrt{3}}}{I_{1s}}=\frac{610}{\sqrt{3}\times 31}=11.361\quad\Omega$$

定格電圧 $V_n=3000$ V で拘束試験をするときの線電流 I'_{1s} は，

$$I'_{1s}=\frac{\frac{V_n}{\sqrt{3}}}{Z_s}=\frac{3000}{\sqrt{3}\times 11.361}=152.46\quad\mathrm{V}$$

この場合の二次入力 P_2 は，

$$P_2=3r_2'I_{1s}'^2=3\times 1.3437\times 152.46^2=93\,699\ \mathrm{W}\ \rightarrow\ 93.7\ \mathrm{kW}\quad\cdots(答)$$

(3) 同期速度 N_0 は，定格周波数を f，極数を p とすると，

$$N_0=\frac{120f}{p}=\frac{120\times 50}{6}=1\,000\quad\mathrm{min^{-1}}$$

定格電圧始動時の始動トルク T_0 は，定格電圧時の二次入力 P_2 を用いて，

$P_2=\omega_0 T_0=\dfrac{2\pi}{60}N_0T_0$ の関係から，

$$T_0=\frac{60P_2}{2\pi N_0}=\frac{60\times 93\,696}{2\pi\times 1\,000}=894.73\ \rightarrow\ 895\ \mathrm{N\cdot m}\quad\cdots(答)$$

(4) 求める始動電圧を V_x とすると，電圧は電流に比例するので，

$$V_x=V_1\times\frac{200}{410}=3\,000\times\frac{200}{410}=1\,463.4\ \rightarrow\ 1\,460\ \mathrm{V}\quad\cdots(答)$$

求める始動トルクを T_x とすると，トルクは電圧の 2 乗に比例するので，

$$T_x=T_0\left(\frac{V_x}{V_1}\right)^2=894.73\times\left(\frac{1\,463.4}{3\,000}\right)^2=212.90\ \rightarrow\ 213\ \mathrm{N\cdot m}\quad\cdots(答)$$

〔問 2 の標準解答〕

(1) A 点では，電機子電流値が零なので，無負荷誘導起電力と端子電圧は等しい。

A 点での無負荷誘導起電力を E_a とすると，

端子電圧 V_n ＝ 無負荷誘導起電力 E_a

であり，無負荷誘導起電力 $E = kI_{\mathrm{f}}$ なので，

$$E_{\mathrm{a}} = V_{\mathrm{n}} = kI_{\mathrm{fa}}$$

$$\therefore I_{\mathrm{fa}} = \frac{V_{\mathrm{n}}}{k}\ \text{[p.u.]} \quad \cdots\text{(答)}$$

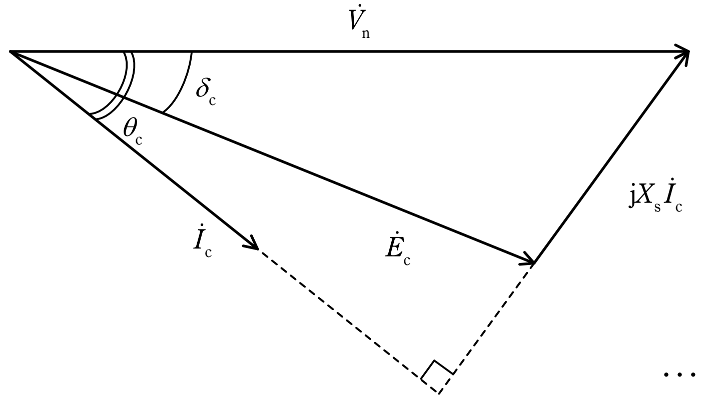
(2) B 点での同期機の出力 P_{b} [p.u.]は，そのときの力率角を θ_{b} とすると，

$$P_{\mathrm{b}} = P_1 = V_{\mathrm{n}} I_{\mathrm{b}} \cos\theta_{\mathrm{b}}$$

V 曲線では電機子電流最小の点の力率は 1.0 であるので，$\cos\theta_{\mathrm{b}} = 1.0$

$$\therefore I_{\mathrm{b}} = \frac{P_1}{V_{\mathrm{n}}}\ \text{[p.u.]} \quad \cdots\text{(答)}$$

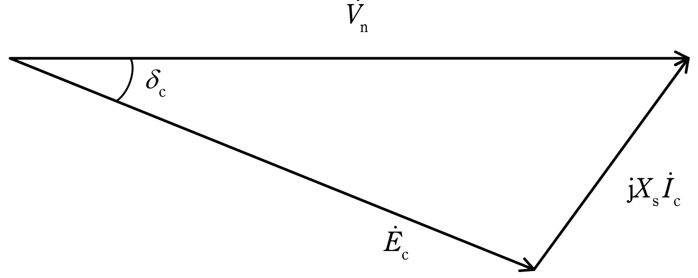
(3)



…(答)

注）力率角 θ_{c} と負荷角 δ_{c} の大小関係が逆になっていてもよい。

(4)



フェーザ図の三角形に余弦定理を適用して，

$$(X_{\mathrm{s}} I_{\mathrm{c}})^2 = E_{\mathrm{c}}^{\ 2} + V_{\mathrm{n}}^{\ 2} - 2E_{\mathrm{c}} V_{\mathrm{n}} \cos\delta_{\mathrm{c}}$$

$$\therefore I_{\mathrm{c}} = \frac{1}{X_{\mathrm{s}}}\sqrt{E_{\mathrm{c}}^{\ 2} + V_{\mathrm{n}}^{\ 2} - 2E_{\mathrm{c}} V_{\mathrm{n}} \cos\delta_{\mathrm{c}}}\ \text{[p.u.]} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \text{①}$$

…(答)

(5) まず，$\cos\delta_{\mathrm{c}}$ を①式から消去する。

C 点における同期機の出力 $P_{\mathrm{c}} = P_1 = \dfrac{E_{\mathrm{c}} V_{\mathrm{n}} \sin\delta_{\mathrm{c}}}{X_{\mathrm{s}}}$ ［p.u.］であるので，

$$\sin\delta_{\mathrm{c}} = \frac{P_1 X_{\mathrm{s}}}{E_{\mathrm{c}} V_{\mathrm{n}}} \qquad \therefore \cos\delta_{\mathrm{c}} = \sqrt{1 - \left(\frac{P_1 X_{\mathrm{s}}}{E_{\mathrm{c}} V_{\mathrm{n}}}\right)^2}$$

上式を，①式に代入すると，

$$I_{\mathrm{c}} = \frac{1}{X_{\mathrm{s}}} \sqrt{E_{\mathrm{c}}{}^2 + V_{\mathrm{n}}{}^2 - 2E_{\mathrm{c}} V_{\mathrm{n}} \sqrt{1 - \left(\frac{P_1 X_{\mathrm{s}}}{E_{\mathrm{c}} V_{\mathrm{n}}}\right)^2}}$$

$$= \frac{1}{X_{\mathrm{s}}} \sqrt{E_{\mathrm{c}}{}^2 + V_{\mathrm{n}}{}^2 - 2\sqrt{(E_{\mathrm{c}} V_{\mathrm{n}})^2 - (P_1 X_{\mathrm{s}})^2}}$$

次に，E_{c} を消去するために，$E_{\mathrm{c}} = kI_{\mathrm{fc}}$ を代入して，

$$I_{\mathrm{c}} = \frac{1}{X_{\mathrm{s}}} \sqrt{(kI_{\mathrm{fc}})^2 + V_{\mathrm{n}}{}^2 - 2\sqrt{(kI_{\mathrm{fc}} V_{\mathrm{n}})^2 - (P_1 X_{\mathrm{s}})^2}} \ \text{［p.u.］} \quad \cdots(\text{答})$$

〔問 3 の標準解答〕

(1) 電動機の負荷特性とドライブシステムの入力電力

トルクが速度の 2 乗に比例する特性では，負荷トルク $T \propto \omega_0{}^2$ なので，それぞれに ω_0 を掛けることによって，入力電力は $\omega_0{}^3$ に比例し，$P_0 = k_1 \omega_0{}^3$（k_1 は定数）となる。

定トルク負荷特性では，負荷トルク T は ω_0 に関係なく一定なので，それぞれに ω_0 を掛けることによって，入力電力は ω_0 に比例し，$P_0 = k_2 \omega_0$（k_2 は定数）となる。

(2) 定トルク負荷の加減速と誘導電動機の入力電力

$$P_1 = \omega T_1 = \omega\left(J\frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t} + T_{\mathrm{L}}\right) = \omega J\frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t} + \omega T_{\mathrm{L}} = P_{\mathrm{a}} + P_{\mathrm{c}} \quad \cdots(\text{答})$$

(3) 誘導電動機の入力電力の符号

上式において，重力負荷による定トルク T_{L} は，上昇，下降にかかわらず正の一定値であり，上昇等加速及び下降等減速の場合 $\dfrac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t}$ は正の一定値，上昇等減速及び下降等加速の場合 $\dfrac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t}$ は負の一定値である。そして，J は定数である。したがっ

て，質量が上昇の場合は $P_{\mathrm{c}}=\omega T_{\mathrm{L}}>0$，下降の場合は $P_{\mathrm{c}}<0$ となる。また，上昇及び下降の加速の場合は $P_{\mathrm{a}}=\omega J\dfrac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t}>0$，上昇及び下降の減速の場合は $P_{\mathrm{a}}<0$ となり，一定速度 ω_1 の場合は $P_{\mathrm{a}}=0$ である。したがって，この 6 通りの組み合わせによって電力 $P_1=P_{\mathrm{a}}+P_{\mathrm{c}}$ は変わり，特に上昇の減速及び下降の加速は $\left|J\dfrac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t}\right|$ と T_{L} の大小によって符号が決まる。

以上をまとめると，それぞれの運転モードにおいては以下の符号となる。

モード 1(上昇・加速)では，$P_{\mathrm{a}}>0$，$P_{\mathrm{c}}>0$ なので $P_1>0$

モード 2(上昇・一定速)では，$P_{\mathrm{a}}=0$，$P_{\mathrm{c}}>0$ なので $P_1>0$

モード 3(上昇・減速)では，$P_{\mathrm{a}}<0$，$P_{\mathrm{c}}>0$ なので P_1 の正負は運転モードだけでは決まらず，例えば $T_{\mathrm{L}}>\left|J\dfrac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t}\right|$ であれば，$P_1>0$ となる。

モード 4(下降・加速)では，$P_{\mathrm{a}}>0$，$P_{\mathrm{c}}<0$ なので P_1 の正負は運転モードだけでは決まらず，例えば $T_{\mathrm{L}}>\left|J\dfrac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t}\right|$ であれば，$P_1<0$ となる。

モード 5(下降・一定速)では，$P_{\mathrm{a}}=0$，$P_{\mathrm{c}}<0$ なので $P_1<0$

モード 6(下降・減速)では，$P_{\mathrm{a}}<0$，$P_{\mathrm{c}}<0$ なので $P_1<0$

(4) 誘導電動機の入力電力が負になるときの対処の例

ダイオード整流器を使用するのであれば，直流回路に電力を消費する抵抗とその電流を制御するスイッチを設け，直流電圧が過大にならないようスイッチをオンオフ制御する発電運転を行う。あるいは，直流回路からチョッパを介して二次電池を接続し，直流電圧が過大にならないように電池の充放電制御を行う。

あるいは，ダイオード整流器を回生用 PWM コンバータに置き換え，直流電圧が一定になるように PWM コンバータで電圧制御を行う。

〔問 4 の標準解答〕

(1) 2 次遅れ系の標準形の周波数伝達関数 $G(\mathrm{j}\omega)$ は次のようになる。

$$G(\mathrm{j}\omega)=\frac{\omega_{\mathrm{n}}^{2}}{(\mathrm{j}\omega)^2+2\zeta\omega_{\mathrm{n}}(\mathrm{j}\omega)+\omega_{\mathrm{n}}^{2}}=\frac{1}{1-\left(\dfrac{\omega}{\omega_{\mathrm{n}}}\right)^2+\mathrm{j}2\zeta\dfrac{\omega}{\omega_{\mathrm{n}}}} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots ①$$

したがって，周波数応答の振幅は次式で与えられる。

$$|G(\mathrm{j}\omega)| = \frac{1}{\sqrt{\left[1-\left(\dfrac{\omega}{\omega_{\mathrm{n}}}\right)^2\right]^2 + 4\zeta^2\left(\dfrac{\omega}{\omega_{\mathrm{n}}}\right)^2}} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots ②$$

$\cdots$(答)

(2)　$f(x)$を平方完成に変形する。

$$\begin{aligned} f(x) &= (1-x)^2 + 4\zeta^2 x = x^2 + (4\zeta^2 - 2)x + 1 \\ &= (x + 2\zeta^2 - 1)^2 + 1 - (2\zeta^2 - 1)^2 \\ &= (x + 2\zeta^2 - 1)^2 + 4\zeta^2 - 4\zeta^4 \end{aligned} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots ③$$

題意から$0 < \zeta < \dfrac{\sqrt{2}}{2}$なので，③式から，$f(x)$は，

$$x_{\mathrm{p}} = 1 - 2\zeta^2 \quad \cdots\text{（答）}$$

のとき最小値$f(x_{\mathrm{p}}) = 4\zeta^2 - 4\zeta^4$をとることがわかる。したがって，②式から，$|G(\mathrm{j}\omega)|$の最大値である$M_{\mathrm{p}}$は次式で表される。

$$M_{\mathrm{p}} = \frac{1}{\sqrt{4\zeta^2 - 4\zeta^4}} = \frac{1}{2\zeta\sqrt{1-\zeta^2}} \quad \cdots\text{（答）}$$

題意から$0 < \zeta < \dfrac{\sqrt{2}}{2}$なので，$M_{\mathrm{p}}$は正の実数となる。

（別解）

$f(x)$を微分して最小値を求める。

$$f(x) = (1-x)^2 + 4\zeta^2 x \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots ④$$

をxで微分すると次のようになる。

$$f'(x) = -2(1-x) + 4\zeta^2 = 2x + (4\zeta^2 - 2)$$

$f'(x) = 0$を満たすxをx_{p}とする。

$$x_{\mathrm{p}} = 1 - 2\zeta^2 \quad \cdots\text{（答）}$$

このx_{p}を④式に代入して，

$$\begin{aligned} f(x_{\mathrm{p}}) &= (2\zeta^2)^2 + 4\zeta^2(1 - 2\zeta^2) = 4\zeta^4 + 4\zeta^2 - 8\zeta^4 \\ &= 4\zeta^2 - 4\zeta^4 \end{aligned}$$

を得るので，②式から，$|G(\mathrm{j}\omega)|$の最大値であるM_{p}は，次式となる。

$$M_{\mathrm{p}}=\frac{1}{\sqrt{4\zeta^2-4\zeta^4}}=\frac{1}{2\zeta\sqrt{1-\zeta^2}}\quad\cdots\text{（答）}$$

(3) 閉ループ伝達関数を求める。

$$G_{\mathrm{c}}(s)=\frac{\dfrac{4}{s(1+0.25s)}}{1+\dfrac{4}{s(1+0.25s)}}=\frac{4}{0.25s^2+s+4}=\frac{16}{s^2+4s+16}\quad\cdots\text{（答）}$$

上式と，2次遅れ系の標準形

$$G(s)=\frac{\omega_{\mathrm{n}}{}^2}{s^2+2\zeta\omega_{\mathrm{n}}s+\omega_{\mathrm{n}}{}^2}$$

を係数比較することにより，次式を得る。

$$\omega_{\mathrm{n}}{}^2=16\quad\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\quad ⑤$$

$$2\zeta\omega_{\mathrm{n}}=4\quad\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\quad ⑥$$

⑤，⑥式を，$\omega_{\mathrm{n}}>0$の条件下で解いて，

$$\omega_{\mathrm{n}}=4.0\ \rightarrow\ 4.0\ \mathrm{rad/s}\quad\cdots\text{（答）}$$

$$\zeta=\frac{2}{4.0}=0.5\quad\cdots\text{（答）}$$

となる。

(4) これまでに得た結果を用いて，$\omega_{\mathrm{p}}>0$の条件下で，角周波数ω_{p}と最大振幅M_{p}は，

$$\begin{aligned}\omega_{\mathrm{p}}&=\omega_{\mathrm{n}}\sqrt{1-2\zeta^2}=4.0\times\sqrt{1-2\times0.5^2}=4.0\times\sqrt{0.5}\\&=4.0\times0.707\,1=2.828\,4\ \rightarrow\ 2.83\ \mathrm{rad/s}\quad\cdots\text{（答）}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}M_{\mathrm{p}}&=\frac{1}{2\zeta\sqrt{1-\zeta^2}}=\frac{1}{2\times0.5\times\sqrt{1-0.5^2}}=\frac{1}{\sqrt{0.75}}\\&=\frac{1}{0.866\,0}=1.154\,7\ \rightarrow\ 1.15\quad\cdots\text{（答）}\end{aligned}$$

と求められる。