

平成 24 年度

第 2 種

機械・制御

(第 2 時限目)

答案用紙記入上の注意事項

この試験は、4問中任意の2問を選び解答する方式です。解答する際には、この問題に折込まれている答案用紙（記述用紙）を引き抜いてから記入してください。

以下は、答案用紙記入上の注意事項です。

1. 筆記用具は、濃度HBの鉛筆又はHB（又はB）の芯を用いたシャープペンシルを使用してください。
2. 2枚の答案用紙を引き抜いたらすぐに試験地、受験番号及び生年月日を記入してください。
3. 答案用紙は、白紙解答であっても2枚すべて提出してください。
4. 問題は4問あります。この中から任意の2問を選び、1問につき1枚の答案用紙にて、解答してください。この場合、答案用紙には、選択した問の番号を記入してください。
5. 計算問題については、答案用紙に計算過程を明記してください。また、必要に応じ、計算根拠となる式も書いてください。
6. 計算問題の答は、特に指定がない限り、有効数字は3けたです。なお、解答以外の数値のけた数は、誤差が出ないように多く取ってください。

例：線電流 I は

$$I = \frac{P}{\sqrt{3}V \cos \theta} = \frac{10 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 200 \times 0.9} = 32.075 \text{ [A]} \quad \text{答 } 32.1 \text{ [A]}$$

1線当たりの損失 P_L は

$$P_L = I^2 R = 32.075^2 \times 0.2 = 205.76 \text{ [W]} \quad \text{答 } 206 \text{ [W]}$$

以 上

（この問題は持ち帰ってください。また、白紙部分はメモ用紙として使用できます。）

問 1～問 4 の中から任意の 2 問を解答すること。(配点は 1 問題当たり 30 点)

問 1 図 1 のように、他励直流電動機を 200 [V] の直流電源に接続し、定格トルクを課したところ、軸出力は 3.75 [kW] で、回転速度は 1500 [min^{-1}]、電機子電流は 20 [A]、正負ブラシの全電圧降下は 2.5 [V] であった。ただし、電動機の許容最高回転速度は十分に高く、界磁電流は一定とし、鉄損、界磁損及び機械損は無視できるものとする。

この電動機を図 2 のように可逆チョッパに接続した。可逆チョッパの直流入力電圧は 200 [V] であり、IGBT の電圧降下は 2 [V]、逆並列ダイオードの電圧降下は 1 [V] とする。ただし、スイッチング損失、平滑リアクトルの抵抗及び出力電流リップルは無視できるものとする。次の値を求めよ。

- (1) 電機子巻線抵抗 [Ω]
- (2) 定格トルクを課し、回転速度が 1500 [min^{-1}] のときの誘導起電力 [V]
- (3) 可逆チョッパに接続し、定格トルクを課した場合の最高回転速度 [min^{-1}]
- (4) 回転速度 1000 [min^{-1}] で、定格の 50 [%] トルクの負荷を課した場合の電機子の端子電圧 [V]
- (5) 上記(4)の運転状態とするための IGBT S_1 の通流率
- (6) 制動トルクを定格トルクに制御できる回転速度 [min^{-1}] の範囲

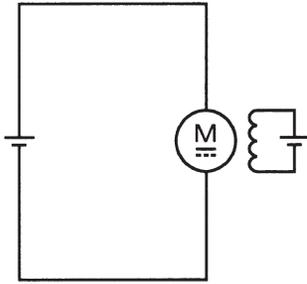


图 1

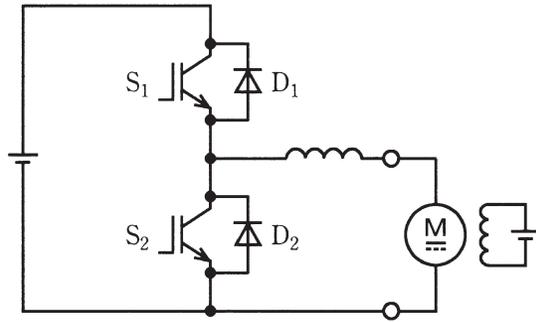


图 2

問2 同期発電機の誘導起電力と巻線係数に関して、図を参照して次の問に答えよ。

(1) 同期発電機のコイル辺間隔が磁極間隔に等しく電気角で π [rad] 隔たり (全節巻), かつ, 毎極毎相のスロット数が1(集中巻)の場合, 1相の誘導起電力の実効値 E [V] を, 周波数 f [Hz], 1相のコイル直列巻数 n_c 及びコイルと鎖交する磁束の最大値 Φ_m [Wb] を用いて表す式を導出せよ。ここで, コイルと鎖交する磁束の瞬時値 ϕ [Wb] は $\phi = \Phi_m \cos \omega t$ とする。

(2) 毎極毎相の導体を1個のスロットに納めないで, 何個かのスロットに分布して配置するのを分布巻という。一般に, 毎極毎相のスロット数を n , 相数を m とすれば, 各コイル間の誘導起電力の基本波の場合の位相差は $\frac{\pi}{mn}$ となり, n 個のコイルが発生する誘導起電力に関して, そのベクトル和の代数和に対する比を分布係数 K_d という。図1を参照して, 基本波に対する分布係数 K_d を m 及び n を用いて表す式を導出せよ。また, その算出式を使って, $m = 3$, $n = 3$ として, 基本波に対する分布係数 K_d を算出せよ。

なお, $\sin \frac{\pi}{9} = 0.34202$, $\sin \frac{\pi}{18} = 0.17365$, $\sin \frac{\pi}{27} = 0.11609$ とする。

(3) コイル辺の間隔を磁極間隔より狭いコイルを用いた巻線を短節巻といい, コイル両辺の誘導起電力に位相差が生じ, コイル両辺の誘導起電力のベクトル和がコイル1個の誘導起電力となり, このベクトル和のコイル両辺の誘導起電力の代数和に対する比を短節係数 K_p という。図2を参照して, コイル間隔が $\beta\pi$ [rad] ($\beta < 1$) で, 基本波に対する短節係数 K_p を β を用いて表す式を導出せよ。また, その算出式を使って, $\beta = \frac{2}{3}$ の場合の基本波に対する短節係数 K_p を算出せよ。

(4) 分布巻で短節巻である巻線の1相の誘導起電力の実効値 E [V] を, 上記(1)で導出した全節巻及び集中巻の場合の1相の誘導起電力の実効値の式と分布係数 K_d と短節係数 K_p を用いて表す式を導出せよ。また, $f = 50$ [Hz], $n_c = 12$, $\Phi_m = 1.5$ [Wb] として, $m = 3$, $n = 3$ の基本波に対する K_d , 及び $\beta = \frac{2}{3}$ の場合の基本波に対する K_p を代入して, 分布巻で短節巻である巻線の E [V] を算出せよ。

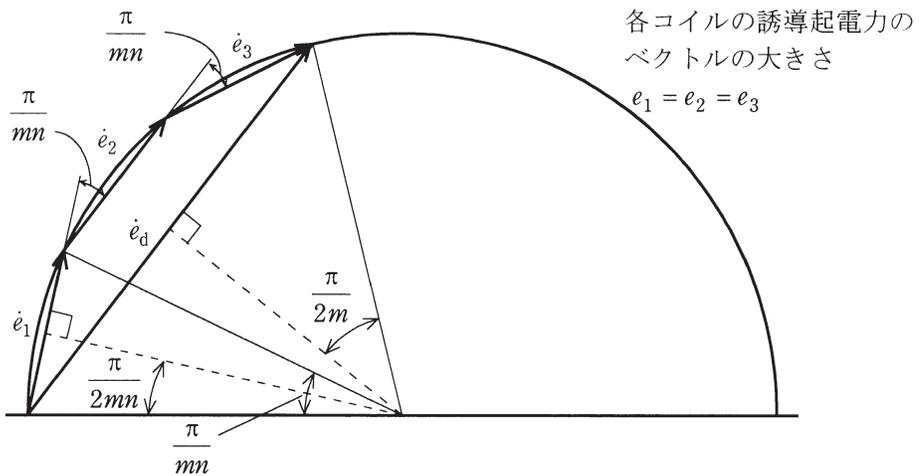


図 1 分布係数の説明図 ($n=3$ の場合の例)

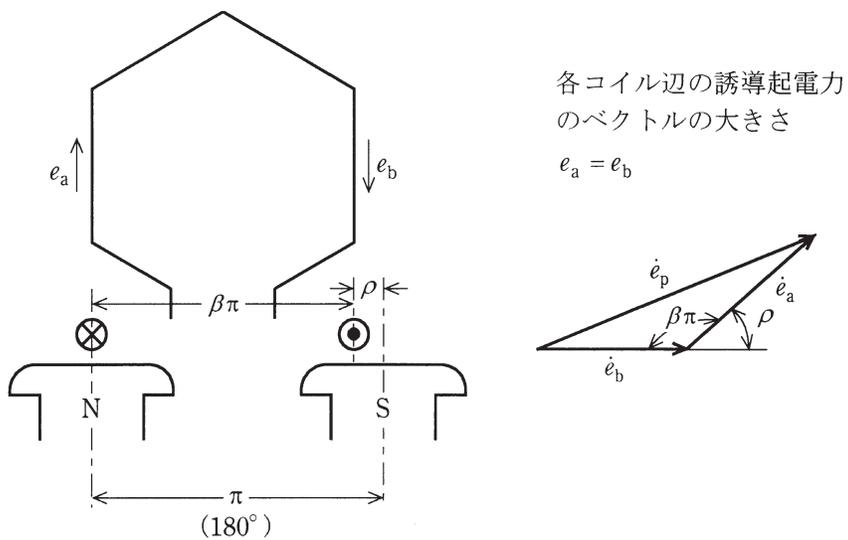


図 2 短節係数の説明図

問3 図1に示す単相PWM制御電圧形インバータは、定格交流電流30[A]，直流電圧 $E_d = 150$ [V] であり，リアクタンス $X = 0.4$ [Ω] のリアクトル(抵抗は，無視できるものとする。)を介して電圧 $V_L = 100$ [V] の交流電源に連系している。このインバータに次の信号 s

$$s = K \sin(\omega t + \phi)$$

を入力したとき，インバータにおける出力交流電圧の基本波瞬時値 v_v は，次になるものとする。

$$v_v = E_d \cdot K \sin(\omega t + \phi) \text{ [V]}$$

ここで， K ：変調率 ($0 \leq K \leq 1$) (1まで可能なものとする。)

ω ：交流電源の角周波数

ϕ ：交流電源電圧の位相を基準とした v_v の位相角

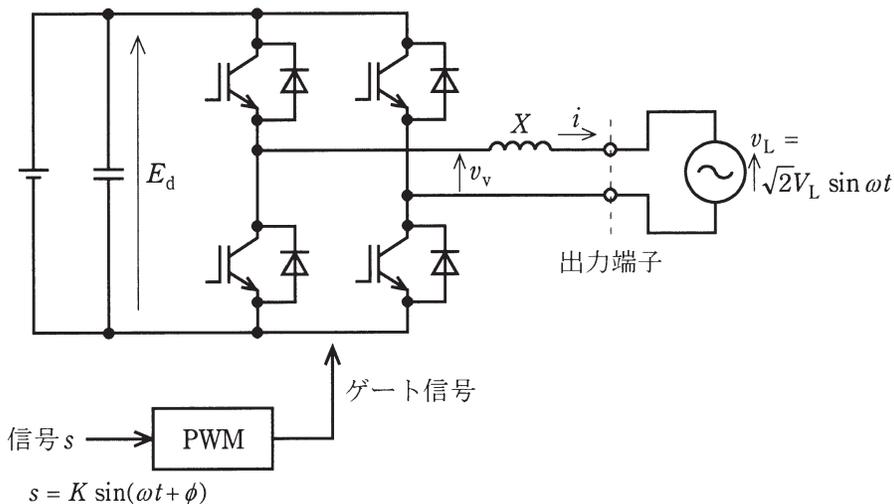


図 1

このインバータで交流電流 i を出力したときの動作について次の間に答えよ。ただし，高調波は考えないものとする。

- (1) フェーザで表したインバータ出力電流 \dot{I} ，交流電源電圧 V_L (位相の基準としているので実数で表示) 及び X を用いて，インバータ出力電圧 \dot{V}_v を求める式を示せ。

(2) このインバータが図 1 に示す出力端子において 3 [kW] の有効電力を力率 1 で出力している。このとき、次の値を求めよ。

- a. \dot{V}_v の大きさ V_v [V] (実効値)
- b. K
- c. $\tan \phi$

(3) このインバータを力率 1 以外でも運転するものとする。出力電流 \dot{I} を実数分 I_p と虚数分 I_Q とに分けて $\dot{I} = I_p + jI_Q$ と表す。 I_p , I_Q , V_L 及び X を用いて V_v [V] の値を求める式を示せ(絶対値の記号を付けただけでは不可。その値を求める式とする。)

(4) I_p 及び I_Q の出力可能な範囲は、図 2 の網掛け範囲となる。 \dot{I} の大きさ (実効値) I [A] は、定格電流である 30 [A] に制限される。 I_p は、インバータとして正の範囲 (零を含む) に限定している。このほか、上記 (3) の V_v の値を求める式で、 V_v が $K = 1$ のときの値 $\frac{E_d}{\sqrt{2}}$ [V] に制限されることによって電流の範囲が制限される。 $I_p = 0$ [A] における I_Q の最小値 I_{Qmin} [A] の値を求めよ。

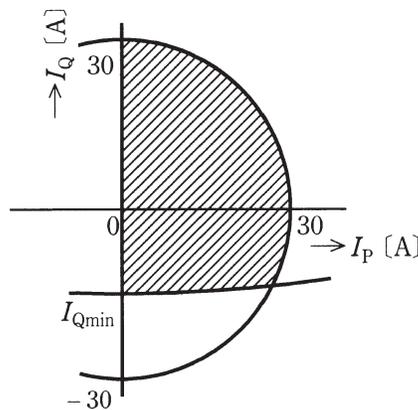
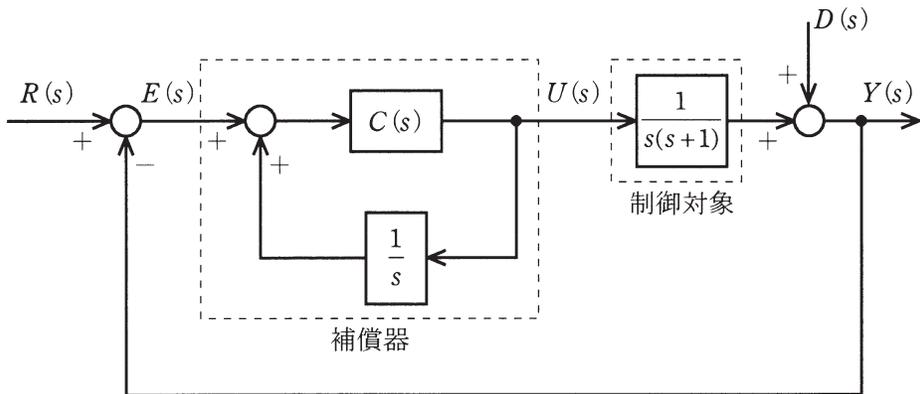


図 2

問4 図のフィードバック制御系について、次の問に答えよ。ただし、 $R(s)$ 、 $E(s)$ 、 $U(s)$ 、 $D(s)$ 及び $Y(s)$ は、目標値 $r(t)$ 、偏差 $e(t)$ 、制御入力 $u(t)$ 、外乱 $d(t)$ 及び出力 $y(t)$ をそれぞれラプラス変換したものであり、 $C(s)$ は点線で囲んだ補償器内の補償要素の伝達関数を表す。



- (1) $D(s)=0$ の場合、制御対象だけを取り出したとき、 $u(t)$ として単位ステップ入力を加えたときの出力応答 $y(t)$ を求めよ。
- (2) 点線で囲んだ補償器だけを取り出したとき、 $E(s)$ から $U(s)$ までの伝達関数を求めよ。
- (3) 図のフィードバック制御系において、 $R(s)=0$ のとき、 $D(s)$ から $E(s)$ までの伝達関数を求めよ。
- (4) $R(s)=0$ の場合、 $C(s)$ として、 $C(s)=\frac{s}{Ts+1}$ を選んだとき、外乱 $d(t)$ がランプ関数 $d(t)=t$ ($t \geq 0$)で与えられるときの定常速度偏差を求めよ。
- (5) (4)の $C(s)$ を選んだとき、外乱 $d(t)$ の影響が偏差 $e(t)$ に現れないようにするには、 $C(s)$ の時定数 T をどのように選ばばよいかを説明せよ。
- (6) 点線で囲んだ補償器を $K_1 + \frac{K_2}{s}$ に置き換えたときのフィードバック制御系が安定となる条件を求めよ。

●平成24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) 電動機出力（ポンプ入力）＝電動機入力×電動機効率 なので、

$$A \quad \cdot P_M = P_{Mi} \times \boxed{\eta_M} \quad \dots \textcircled{1}$$

$$B \text{ 又は } C \quad \cdot P_{Mi} = \boxed{S_M} \times \boxed{\phi_M} \quad \dots \textcircled{2}$$

$$D \text{ 又は } E \quad \cdot P_G = \boxed{S_G} \times \boxed{\phi_G} \quad \dots \textcircled{3}$$

(2) $S_G = S_M$ なので、上記 3 式から、 $P_G = \frac{\phi_G P_M}{\phi_M \eta_M}$
 発電機出力と発電使用水量の関係から、

$$P_G = \eta_T \eta_G g \rho Q_G (H - H_L) \times 10^{-6}$$

なので、

$$Q_G = \frac{\phi_G P_M \times 10^6}{\eta_T \eta_G g \rho (H - H_L) \phi_M \eta_M} \quad \dots \textcircled{4}$$

(3) ④式で $P_M = 100$ [MW] とすると、

$$Q_G = \frac{0.8 \times 100 \times 10^6}{0.9 \times 0.95 \times 9.8 \times 1000 \times (150 - 10) \times 1.0 \times 0.97}$$

$$= 70.3069 \rightarrow 70.3 \text{ [m}^3/\text{s]}$$

$$(4) \frac{V}{Q_G} = \frac{2\,000\,000}{70.3} = 28\,449 \text{ [s]} \rightarrow \text{約} 28\,400 \text{ [s]} \quad (\text{又は約} 7 \text{ 時間} 54 \text{ 分})$$

なお、(4)は(1)～(3)の条件において計算することから、答は主変圧器容量 T [MV・A] にはよらない。

[問2の標準解答]

(1) 遮へい失敗事故：雷が電力線を直撃してアークホーンにフラッシュオーバが発生する。

逆フラッシュオーバ事故：架空地線あるいは鉄塔への雷撃によって架空地線あるいは鉄塔の電位が上昇し、架空地線と導体間、又はアークホーンにフラッシュオーバが発生する。

(2) ① 架空地線の弛度を電力線のそれより小さくすることで、架空地線と導体間のフラッシュオーバを低減する。

② 埋設地線、深打ち電極及び接地シートなどにより鉄塔の塔脚接地抵抗を低減することで、鉄塔の電位上昇による逆フラッシュオーバを低減する。

③ 架空地線を多条化することで、鉄塔の電位上昇による逆フラッシュオーバを低減する。

④ 系統に過電圧が侵入した場合に、フラッシュオーバが継続して送電線が遮断されるのを防止するため、送電用避雷装置を設置する。

[問3の標準解答]

(1) 遮へい線がない場合通信線に誘導される電圧 \dot{V} は

$$\dot{V} = 3\dot{Z}_{12}\dot{I}_0$$

(2) 遮へい線に流れる電流 \dot{I}_S は, \dot{I}_0 による誘導電圧を打ち消すように流れる。

したがって, 次式が成り立つ。

$$3\dot{Z}_{1S}\dot{I}_0 + \dot{Z}_S\dot{I}_S = 0$$

$$\dot{I}_S = -\frac{3\dot{Z}_{1S}\dot{I}_0}{\dot{Z}_S}$$

通信線に生じる誘導電圧 \dot{V}' は送電線の電流 $3\dot{I}_0$ と遮へい線を通る誘導電流 \dot{I}_S による誘導電圧の和だから次式となる。

$$\begin{aligned}\dot{V}' &= 3\dot{Z}_{12}\dot{I}_0 + \dot{Z}_{2S}\dot{I}_S = 3\dot{Z}_{12}\dot{I}_0 + \dot{Z}_{2S}\left(\frac{-3\dot{Z}_{1S}\dot{I}_0}{\dot{Z}_S}\right) \\ &= 3\dot{Z}_{12}\dot{I}_0\left(1 - \frac{\dot{Z}_{1S}\dot{Z}_{2S}}{\dot{Z}_{12}\dot{Z}_S}\right) = 3\dot{I}_0\left(\dot{Z}_{12} - \frac{\dot{Z}_{1S}\dot{Z}_{2S}}{\dot{Z}_S}\right) \\ &= \dot{V}\left(1 - \frac{\dot{Z}_{1S}\dot{Z}_{2S}}{\dot{Z}_{12}\dot{Z}_S}\right)\end{aligned}$$

(3) 送電線近傍に遮へい線を設置した場合の誘導電圧を \dot{V}'_T とし, 通信線近傍に遮へい線を設置した場合の誘導電圧を \dot{V}'_C としたとき, $|\dot{V}'_T| > |\dot{V}'_C|$ となるので, 通信線のできるだけ近くに遮へい線を設置するのが良い。

[理由]

遮へい線を送電線近傍に設置したとき $\dot{Z}_{2S} \doteq \dot{Z}_{12}$ となり, 通信線の近傍に設置したとき $\dot{Z}_{1S} \doteq \dot{Z}_{12}$ となる。したがって, \dot{V}'_T と \dot{V}'_C は各々次式で近似される。

$$\dot{V}'_T = \dot{V}\left(1 - \frac{\dot{Z}_{1S}}{\dot{Z}_S}\right) \quad \dot{V}'_C = \dot{V}\left(1 - \frac{\dot{Z}_{2S}}{\dot{Z}_S}\right)$$

ここで, 遮へい線との離隔距離が小さいほど相互インピーダンスが大きくなり, 自己インピーダンス \dot{Z}_S との比が 1 に近い値となるので通信線に誘導される電圧は小さくなる。実際に遮へい線を設置する場合, 電圧の違いに

より、電力線の近傍に設置する場合は通信線の近傍に設置する場合と比べて
離隔距離を小さくすることができない。

したがって、

$$|\dot{Z}_S| > |\dot{Z}_{2S}| > |\dot{Z}_{1S}|$$

となり、次式が成り立つ。

$$\left| 1 - \frac{\dot{Z}_{1S}}{\dot{Z}_S} \right| > \left| 1 - \frac{\dot{Z}_{2S}}{\dot{Z}_S} \right|$$

したがって、 $|\dot{V}_T| > |\dot{V}_C|$ となるので、通信線のできるだけ近くに遮へい線を
設置するのが良い。

[問4の標準解答]

(1) 連系する発電設備は800 [kV・A], %Z=15 [%] (マシンベース) なので,

当該発電設備の%Zは,

$$\frac{15 [\%] \times 10\,000 [\text{kV} \cdot \text{A}]}{800 [\text{kV} \cdot \text{A}]} = 187.5 [\%] \rightarrow 188 [\%]$$

(2) 10 [MV・A] をベースとしたインピーダンスマップを作成すると以下のとおりとなる。

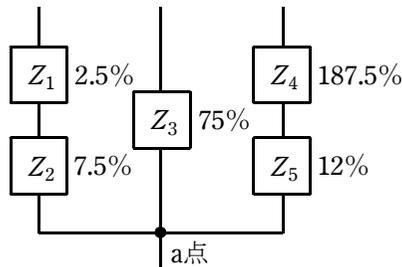
配電用変電所の上位系統の%Z : $Z_1 = 2.5 [\%]$

配電用変電所の変圧器の%Z : $Z_2 = 7.5 [\%]$

発電設備 G1 の%Z : $Z_3 = \frac{15 [\%] \times 10\,000 [\text{kV} \cdot \text{A}]}{2\,000 [\text{kV} \cdot \text{A}]} = 75 [\%]$

発電設備 G2 の%Z : $Z_4 = 187.5 [\%]$

新たに連系する発電設備までの高圧配電線の%Z : $Z_5 = 12 [\%]$



上記インピーダンスマップに基づき, %Zの合成値を求めると,

$$\%Z = \frac{1}{\frac{1}{2.5+7.5} + \frac{1}{75} + \frac{1}{187.5+12}} = 8.449 \rightarrow 8.45 [\%]$$

(3) 三相短絡容量 P_S は

$$P_S = \frac{10\,000 [\text{kV} \cdot \text{A}] \times 100}{8.449} = 118.4 [\text{MV} \cdot \text{A}]$$

したがって, 三相短絡電流 I_S は

$$I_S = \frac{118.4 [\text{MV} \cdot \text{A}]}{\sqrt{3} \times 6.6 [\text{kV}]} = 10.35 \rightarrow 10.4 [\text{kA}]$$

(4) 三相短絡電流が 10 [kA] となるためには、三相短絡容量 P'_S は

$$P'_S = 10 \text{ [kA]} \times \sqrt{3} \times 6.6 \text{ [kV]} = 114.3 \text{ [MV}\cdot\text{A]}$$

したがって、合成%Zは、

$$\%Z = \frac{10 \text{ 000 [kV}\cdot\text{A]} \times 100}{114.3 \text{ [MV}\cdot\text{A]}} = 8.749 \text{ [%]}$$

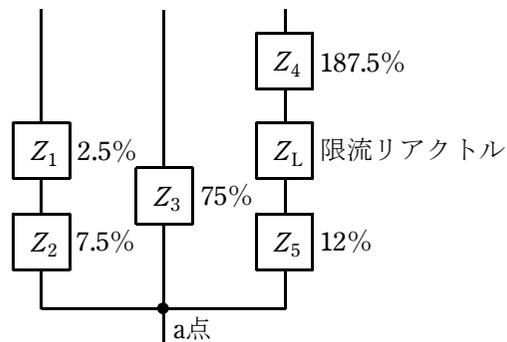
求める限流リアクトルのインピーダンスを% Z_L とすると、

$$\%Z = \frac{1}{\frac{1}{2.5+7.5} + \frac{1}{75} + \frac{1}{187.5+12+\%Z_L}} = 8.749 \text{ [%]}$$

式を整理すると

$$\begin{aligned} \%Z_L &= \frac{8.749}{1 - 8.749 \times \left(\frac{1}{2.5+7.5} + \frac{1}{75} \right)} - (187.5+12) \\ &= \frac{8.749}{1 - 8.749 \times 0.1133} - 199.5 \\ &= 1006 - 199.5 \\ &= 806.5 \rightarrow 807 \text{ [%]} \end{aligned}$$

(注) 桁数の取り方、計算の順序により上記とは異なる正答もある。



[問5の標準解答]

(1) 図2において、変圧器タップ電圧の微小調整量 Δn は線路 x_1 と線路 x_2 の電圧変化量の和であり、

$$\Delta n = x_1 \Delta Q + x_2 \Delta Q = (x_1 + x_2) \Delta Q$$

変電所の電圧変化 ΔV は、線路 x_2 の電圧変化と等しいので、

$$\Delta V = x_2 \Delta Q$$

$\Delta q = 0$ より

$$\therefore A_n = \frac{\Delta V}{\Delta n} = \frac{x_2 \Delta Q}{(x_1 + x_2) \Delta Q} = \frac{x_2}{x_1 + x_2} \quad \dots (\text{答})$$

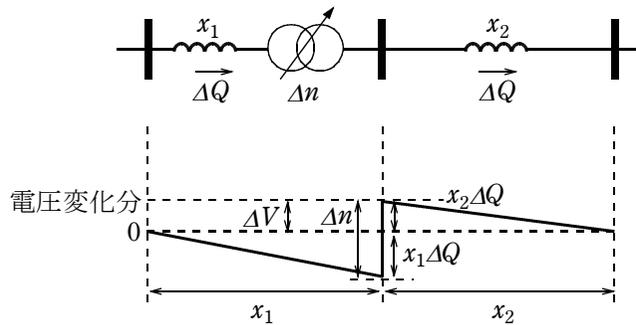


図2 変圧器タップ電圧調整による電圧分布 ($\Delta q = 0$)

(2) 図3において、線路 x_1 の無効電力変化は、

$$\Delta Q = \frac{x_2}{x_1 + x_2} \Delta q$$

変電所の電圧変化 ΔV は、線路 x_1 の電圧変化と等しいので、

$$\Delta V = x_1 \Delta Q = x_1 \frac{x_2}{x_1 + x_2} \Delta q$$

$\Delta n = 0$ より

$$\therefore A_q = \frac{\Delta V}{\Delta q} = \frac{x_1 x_2}{x_1 + x_2} \quad \dots (\text{答})$$

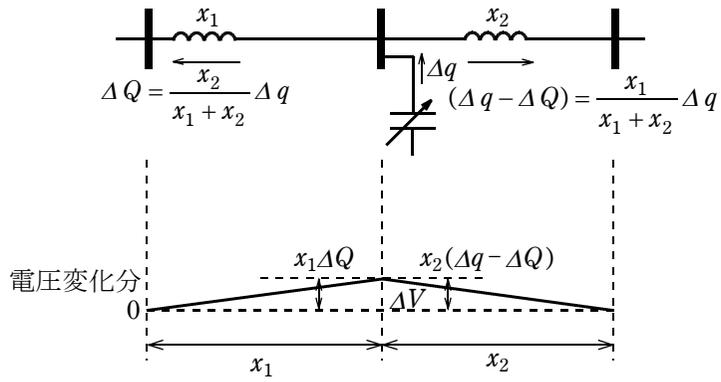


図 3 電力用コンデンサからの無効電力調整による電圧分布 ($\Delta n=0$)

[問6の標準解答]

A：簡易監視制御方式

B：技術員が当該変電所又は 300〔m〕以内にある技術員駐在所に常時駐在し，断続的に変電所に向向いて，変電所の監視及び機器の操作を行うもの

C：技術員が変電制御所又は 300〔m〕以内にある技術員駐在所に常時駐在し，断続的に変電制御所に向向いて，変電所の監視及び機器の操作を行うもの

D：制限なし

E：技術員駐在所

F：変電制御所及び技術員駐在所

< 機械・制御科目 >

[問 1 の標準解答]

(1) 電機子巻線の銅損は、

$$200 \times 20 - 3750 - 2.5 \times 20 = 200 \text{ [W]}$$

したがって、電機子巻線抵抗は、

$$\frac{200}{20^2} = 0.500 \text{ [\Omega]}$$

(2) 誘導起電力は、

$$E_0 = 200 - 2.5 - 0.5 \times 20 = 187.5 \rightarrow 188 \text{ [V]}$$

(3) IGBT の電圧降下を考え、

$$E_0 = 200 - 2 - 2.5 - 0.5 \times 20 = 185.5 \text{ [V]}$$

したがって、回転速度は、

$$\frac{185.5}{187.5} \times 1500 = 1484 \rightarrow 1480 \text{ [min}^{-1}\text{]}$$

(4) 1000 [min⁻¹] の起電力は、

$$\frac{187.5}{1500} \times 1000 = 125 \text{ [V]}$$

ブラシの電圧降下と巻線抵抗を考慮すると電機子の端子電圧は、

$$125 + 2.5 + 0.5 \times 10 = 132.5 \rightarrow 133 \text{ [V]}$$

(5) IGBT S₁ がオンのときの S₂ のコレクタ-エミッタ間電圧は、S₁ の電圧降下を考えて、

$$200 - 2 = 198 \text{ [V]}$$

オフのときは、ダイオード D₂ の電圧降下により、

$$-1 \text{ [V]}$$

S₁ の通流率を D とすると、チョッパ端子電圧は、

$$198 \times D + (-1)(1 - D) = 199 \times D - 1 \text{ [V]}$$

したがって、 $199 \times D - 1 = 132.5$ [V] を D について解けば、

$$D = \frac{132.5 + 1}{199} = 0.67085 \rightarrow 0.671$$

- (6) 定格トルクを発生する場合の電機子電流は 20 [A] であり、20 [A] の電機子電流を流すためには、少なくとも電圧降下分の起電力が必要であるので、

$$0.5 \times 20 + 2.5 + 2 = 14.5 \text{ [V]}$$

$$\text{このときの回転速度は、} \frac{14.5}{187.5} \times 1500 = 116 \text{ [min}^{-1}\text{]}$$

一方、電機子電流を 20 [A] に制御できる電動機起電力の最大値は、

$$200 + 1 + 2.5 + 0.5 \times 20 = 213.5 \text{ [V]}$$

このときの回転速度は、

$$\frac{213.5}{187.5} \times 1500 = 1708 \rightarrow 1710 \text{ [min}^{-1}\text{]}$$

ゆえに制動トルクを定格トルクに制御できる範囲は、

116 [min⁻¹] から 1710 [min⁻¹]

[問2の標準解答]

(1) コイルに誘導される起電力の瞬時値 e は、

$$e = -n_c \frac{d\phi}{dt} = -n_c \frac{d}{dt} (\Phi_m \cdot \cos \omega t) = n_c \omega \Phi_m \sin \omega t = E_m \sin \omega t$$

となり、

誘導起電力の最大値 E_m は、

$$E_m = n_c \omega \Phi_m = 2\pi f n_c \Phi_m$$

となり、

誘導起電力の実効値 E は、

$$E = \sqrt{2} \pi f n_c \Phi_m = 4.4429 f n_c \Phi_m \rightarrow 4.44 f n_c \Phi_m \text{ [V]}$$

(2) 図1を参照して、 $e_1 = e_2 = e_3 = e_c$ として基本波に対する分布係数 K_d は、

$$K_d = \frac{e_d}{n e_c} = \frac{2 \sin\left(\frac{\pi}{2m}\right)}{n \cdot 2 \sin\left(\frac{\pi}{2mn}\right)} = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2m}\right)}{n \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2mn}\right)}$$

となる。

相数 $m = 3$ 、每極每相のスロット数 $n = 3$ の場合の基本波に対する K_d は、

$$K_d = \frac{\sin \frac{\pi}{6}}{3 \sin \frac{\pi}{18}} = \frac{0.5}{3 \times 0.173648} = 0.95979 \rightarrow 0.960$$

となる。

(3) 図2を参照して、 $e_a = e_b = e_s$ として基本波に対する短節係数 K_p は、

$$K_p = \frac{e_p}{2e_s} = \frac{2e_s \cdot \sin\left(\frac{\beta\pi}{2}\right)}{2e_s} = \sin\left(\frac{\beta\pi}{2}\right)$$

となる。

$\beta = \frac{2}{3}$ の場合の基本波に対する短節係数 K_p は、

$$K_p = \sin \frac{\pi}{3} = 0.86602 \rightarrow 0.866$$

となる。

(4) 上記(1)の全節巻及び集中巻の場合の誘導起電力の式と巻線係数から、分布巻及び短節巻の場合の誘導起電力の実効値 E は、

$$E = 4.44 f n_c \Phi_m K_d K_p \text{ [V]}$$

となる。

周波数 $f = 50$ [Hz]，コイル数 $n_c = 12$ ，コイルに鎖交する磁束の最大値 $\Phi_m = 1.5$ [Wb] として、

$$E = 4.4429 \times 50 \times 12 \times 1.5 \times 0.95979 \times 0.86602 = 3323.6 \rightarrow 3320 \text{ [V]}$$

となる。

[問3の標準解答]

(1) 次の式となる。

$$\dot{V}_v = V_L + jX \cdot \dot{I}$$

(2) 出力電力 3 [kW] , $V_L = 100$ [V] , 力率 1 なので, \dot{I} は大きさ 30 [A] で位相角 0 [°] である。

したがって

$$\dot{V}_v = V_L + jX \cdot \dot{I} = 100 + j0.4 \times 30 = 100 + j12$$

a. $V_v = \sqrt{100^2 + 12^2} = 100.71 \rightarrow 101$ [V]

b. $K = V_v \frac{\sqrt{2}}{E_d} = 100.71 \times \frac{1.4142}{150} = 0.94949 \rightarrow 0.949$

c. $\tan \phi = \frac{12}{100} = 0.120$

(3) 上記(1)で得られた式に $\dot{I} = I_P + jI_Q$ を代入し

$$\dot{V}_v = V_L + jX(I_P + jI_Q) = V_L - X \cdot I_Q + jX \cdot I_P$$

したがって

$$V_v = \sqrt{(V_L - X \cdot I_Q)^2 + (X \cdot I_P)^2}$$

($V_v = |V_L + jX \cdot \dot{I}|$, $V_v = |V_L - X \cdot I_Q + jX \cdot I_P|$ など, 絶対値のままでは不可。)

(4) V_v の範囲から

$$\sqrt{(V_L - X \cdot I_Q)^2 + (X \cdot I_P)^2} \leq \frac{E_d}{\sqrt{2}}$$

$I_P = 0$ として次の解が得られる。

$$I_{Q\min} = \frac{V_L - \frac{E_d}{\sqrt{2}}}{X} = \frac{100 - \frac{150}{\sqrt{2}}}{0.4} = -15.165 \rightarrow -15.2 \text{ [A]}$$

[問 4 の標準解答]

(1) 制御対象のステップ応答

ラプラス変換域におけるステップ応答は,

$$Y(s) = \frac{1}{s(s+1)} U(s) = \frac{1}{s(s+1)} \cdot \frac{1}{s} = \frac{1}{s^2(s+1)} \dots\dots\dots ①$$

で与えられる。この逆ラプラス変換を求めるために、部分分数展開すると,

$$Y(s) = \frac{a}{s^2} + \frac{b}{s} + \frac{c}{s+1}$$

$$= \frac{a(s+1) + bs(s+1) + cs^2}{s^2(s+1)} = \frac{(b+c)s^2 + (a+b)s + a}{s^2(s+1)} \dots\dots\dots ②$$

となり、①式と②式の分子を等しくする部分分数展開の各係数は,

$$b+c=0, \quad a+b=0, \quad a=1$$

を満たす。これから

$$a=1, \quad b=-1, \quad c=1$$

が得られる。したがって、 $Y(s)$ の逆ラプラス変換は,

$$y(t) = \mathcal{L}^{-1} \left\{ \frac{1}{s^2} - \frac{1}{s} + \frac{1}{s+1} \right\} = t - 1 + e^{-t} \quad (t \geq 0)$$

となる。

(2) 補償器の伝達関数の計算

図の信号の関係から

$$U(s) = C(s) \left[E(s) + \frac{1}{s} U(s) \right]$$

が成り立つ。上式を整理すると,

$$U(s) = \frac{sC(s)}{s-C(s)} E(s)$$

となり、補償器の伝達関数は,

$$\frac{sC(s)}{s-C(s)} \dots\dots\dots ③$$

で与えられる。

(3) 伝達関数の計算

$D(s)$ から $E(s)$ までの伝達関数は,

$$\begin{aligned}\frac{E(s)}{D(s)} &= -\frac{1}{1 + \frac{sC(s)}{s-C(s)} \cdot \frac{1}{s(s+1)}} = -\frac{(s+1)[s-C(s)]}{(s+1)[s-C(s)]+C(s)} \\ &= -\frac{(s+1)[s-C(s)]}{s[s-C(s)+1]} \dots\dots\dots ④\end{aligned}$$

で与えられる。

(4) 定常速度偏差の計算

④式へ $C(s) = \frac{s}{Ts+1}$ を代入すると

$$\begin{aligned}\frac{E(s)}{D(s)} &= -\frac{(s+1)\left(s - \frac{s}{Ts+1}\right)}{s\left(s - \frac{s}{Ts+1} + 1\right)} = -\frac{(s+1)\left(1 - \frac{1}{Ts+1}\right)}{s+1 - \frac{s}{Ts+1}} \\ &= -\frac{Ts(s+1)}{Ts^2 + Ts + 1} \dots\dots\dots ⑤\end{aligned}$$

となる。ランプ関数の外乱 $d(t) = t$ に対する定常速度偏差は,

$$e_s = -\lim_{s \rightarrow 0} s \cdot \frac{Ts(s+1)}{Ts^2 + Ts + 1} \cdot \frac{1}{s^2} = -T \dots\dots\dots ⑥$$

で与えられる。

(5) 時定数の選び方

⑤式及び⑥式より, $C(s)$ の時定数 T を小さく選ぶことにより, 偏差に対する外乱の影響を抑制することが可能となる。

(6) 安定判別について

特性方程式は、次式

$$1 + \left(K_1 + \frac{K_2}{s} \right) \cdot \frac{1}{s(s+1)} = 0$$

となり、

$$s^3 + s^2 + K_1 s + K_2 = 0$$

で与えられる。ここで、ラウスの安定判別法を適用する。ラウス表は、

s^3	1	K_1
s^2	1	K_2
s^1	$K_1 - K_2$	0
s^0	K_2	

となり、安定条件は、特性方程式の係数がすべて正より、

$$K_1 > 0, K_2 > 0$$

が得られ、ラウス列の係数がすべて正より、

$$K_1 > K_2, K_2 > 0$$

が得られる。以上をまとめると、安定条件は

$$K_1 > K_2 > 0$$

で与えられる。