

●平成22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

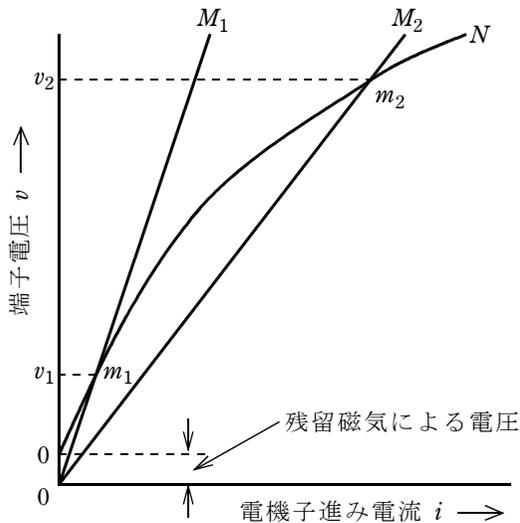
<電力・管理科目>

[問 1 の標準解答]

(1) 回転している同期発電機に、無励磁のまま容量性負荷を接続した場合に発生する現象をいう。

(2) 残留磁気による電圧が進み電流を生じさせ、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值に達して安定する。

容量性負荷の静電容量を C とすれば負荷側から決まる電圧 v と電流 i の関係は $i = (2\pi fC) \cdot v$ であり、図に示すように直線 (M_1 : 静電容量小, M_2 : 静電容量大) となり、最終的には無負荷飽和特性 N と直線 M_1 あるいは M_2 の交点 m_1 (電圧 v_1) あるいは m_2 (電圧 v_2) に到達し安定する。



自己励磁現象

(3) 大容量の水力発電機である。

<理由>

発電機が自己励磁現象を起こすことなく送電線を充電できる最大充電容量 Q は次式より求められる。

$$Q = \frac{v^2}{x_d}$$

ここで、 v : 充電電圧、 x_d : 同期リアクタンス(不飽和値)

水力発電機の自己容量ベースの同期リアクタンスは火力発電機に比べて小さく、また、容量が大きいほど系統からみた同期リアクタンスが小さくなる。そのため最大充電容量が大きくなり最も自己励磁現象を起こしにくい。

(4) ① 受電端に並列リアクトルを接続する。

送電線路の静電容量を補償し、進み電流による自己励磁を減少できる。

② 発電機を複数台、母線に接続する。

各発電機は容量と短絡比との積に比例して充電電流を分担するので安全に充電できる。(ただし、この場合、界磁電流が小さいため同期化力が小さく並列運転に困難を伴う場合もある。)

[問 2 の標準解答]

○電力用コンデンサ

- ・ シンプルな静止機器で，高調波や突入電流を抑制するために直列リアクトルを接続することがある。
- ・ 開閉器の開閉操作によって遅れ無効電力を発生(進み無効電力を補償)・停止する。
- ・ 開閉器の開閉操作により調整するため，電圧や無効電力の変化が段階的となり，きめ細かな電圧調整や安定度の向上への期待はあまりできず，開閉器操作により系統に急激な変化が生じないよう 1 台当たりの容量選定に配慮が必要である。
- ・ シンプルな構造であり，同期調相機や SVC よりも電力損失が小さい。
- ・ 静止機器であるため保守が容易。

○同期調相機

- ・ 無負荷状態で運転する同期電動機。
- ・ 界磁電流の調整により無効電力を発生・吸収(進み・遅れ双方を補償)する装置であり，電圧調整の即応性に優れる。
- ・ 調整が連続的で，回転子の慣性質量により系統の電圧特性や安定度を向上させる効果がある。
- ・ 回転機固有の軸受・ブラシの摩擦損や風損，励磁回路損などの影響により，電力用コンデンサや SVC に比べて電力損失が大きい。
- ・ 回転機であることから，可動部分や補機類があり，電力用コンデンサや SVC に比べて保守に時間と労力が多くかかる。

○静止型無効電力補償装置（SVC）

- ・リアクトル，電力用コンデンサ，これらを制御するサイリスタで構成する装置。

- ・サイリスタの点弧角位相を制御することによりリアクトルや電力用コンデンサの通過電流を連続的に変化させ，無効電力を発生・吸収（進み・遅れ双方を補償）する装置であり，電圧調整の即応性に優れる。

- ・リアクトルや電力用コンデンサ電流の大きさを変化させることにより連続的に調整できるため，系統の電圧特性や安定度を向上させる効果がある。

なお，電力用コンデンサの開閉を行う方式（TSC）では，リアクトル電流の位相制御を行う方式（TCR）と組み合わせることで連続的な調整が可能である。

- ・リアクトル，電力用コンデンサ，サイリスタなど複数機器から構成されるため，電力損失は電力用コンデンサよりも大きい，同期調相機よりも小さい。

- ・静止機器ではあるが，サイリスタ冷却用の装置もあり，保守は電力用コンデンサほど容易ではない。

[問3の標準解答]

- (1) 送電線や変圧器のインピーダンスに比べ中性点抵抗が大きく，送電線インピーダンスと静電容量が無視できるため，一線地絡時には等価的に，相電圧の電源，中性点の抵抗からなる閉ループが構成される。そのため，地絡電流は次のとおりとなる。

$$\frac{77000}{\frac{\sqrt{3}}{100}} = 444.6 \rightarrow 445[\text{A}]$$

- (2) 事故点抵抗が純抵抗成分であるため，上記(1)と同様に抵抗値を $R_1 + R_2$ [Ω] として地絡電流を求めれば良い。

$$\text{地絡電流} : \frac{77000}{\frac{\sqrt{3}}{(100+230)}} = 134.7 \rightarrow 135[\text{A}]$$

ここで，事故回線と健全回線の電流の分流比は送電線インピーダンス，すなわち事故点までの送電線長さに逆比例する。事故回線と健全回線の送電経路のインピーダンス比は 60 [%] : $(200 - 60)$ [%] = $60 : 140$ であるため，各リレーに分流する電流は次のとおりとなる。

$$R_{y1} : 134.7 \times \frac{(200-60)}{200} \times \frac{5}{1000} = 0.4715 \rightarrow 0.472[\text{A}]$$

$$R_{y2} : 134.7 \times \frac{60}{200} \times \frac{5}{1000} = 0.2021 \rightarrow 0.202[\text{A}]$$

$$R_{y3} : 134.7 \times \frac{60}{200} \times \frac{5}{800} = 0.2526 \rightarrow 0.253[\text{A}]$$

(3) 送電端側リレーが両回線動作となるためには送電端の健全回線側のリレー (Ry₂) が動作する範囲を求めればよい。また、受電端側リレーが両回線ともに不動作となるためには受電端側の事故回線側のリレー (Ry₃) が不動作となる範囲を求めればよい。

まず、電源端 Ry₂ が動作する範囲を求める。

Ry₂ の整定値の一次側換算値は $0.3 \times \frac{1000}{5} = 60$ [A] であり、この電流が健全回線側に流れるときの X [%] を求めれば良い。事故回線と健全回線の電流をそれぞれ I₁, I₂ とすると、その比率は事故点までの回線長の逆比となるため、 $I_1 \times X = I_2 \times (200 - X)$ となる。事故電流が 134.7 [A] であるため、 $I_1 + I_2 = 134.7$ [A] となり、 $I_2 = \frac{134.7}{200} \times X$ [A] となる。

よって、 $X = 200 \times \frac{60}{134.7} = 89.09 \doteq 89.1$ [%] であり 89.1 [%] 以上で動作する。

次に、受電端 Ry₃ が不動作となる範囲を求める。

Ry₃ の整定値の一次側換算値は $0.4 \times \frac{800}{5} = 64$ [A] のため同様に

$X = 200 \times \frac{64}{134.7} = 95.03 \doteq 95.0$ [%] となり、95.0 [%] 未満で不動作となる。

∴ 89.1 [%] ≤ X < 95.0 [%]

[問4の標準解答]

(1) ① 変圧器の仕様

短絡電流を抑制するために、変圧器のインピーダンスを大きく設定する。

変圧器のインピーダンスを大きくすれば、電圧変動率が大きくなり、系統安定度が悪くなる方向にいくので、システムコーディネーションの観点から、系統と機器のバランスを考え、変圧器のインピーダンス値を選定している。

例えば、500kV 変圧器で一般的なインピーダンスが 14 [%] に対して、高インピーダンスでは 23 [%] が用いられることが多い。

② 変圧器の機器設計で考慮すべき事項

高いインピーダンスにするために、巻回数の増大、巻線径増大が行われる。

(2) ① 地中送電線用遮断器

地中送電線路では、充電遮断電流の値が架空送電線路より大きいので、進み小電流遮断電流値として、架空送電線路より大きな値が必要である。

例えば、275kV 系統では、充電遮断電流は、架空送電線用では 200 [A] に対して、地中送電線用では 500 [A] が規格化されている。

② リアクトル開閉用遮断器

275 [kV] ではケーブルの充電容量が大きいので、それを補償するためにリアクトルが設置されることが多い。リアクトル開閉用遮断器には、再発弧サージへの考慮が必要である。その抑制対策として、開極位相制御が採用されている。

③ 計器用変圧器

ケーブル系統では残留電荷の減衰時定数が長いので、計器用変圧器によって残留電荷を放電する機能が求められる。

(3) 送電線に発生する開閉過電圧を抑制するため、500kV 変電所に設置される送電線用の遮断器に、抵抗投入方式を採用している。投入抵抗値は 1000 [Ω] が用いられ、開閉過電圧は 2 [p.u.] 以下に抑制されている。最近では、変電所の送電線回路に高性能避雷器を併用する場合も多く、より効果的に送電線に発生する開閉過電圧の抑制が行われている。

[問5の標準解答]

A：零にするよう自系統の発電電力

B：連系系統内の主要系統

C：主要系統との連系線電力

D：バイアス値

E：和（差）を零にするよう自系統の発電電力

F：自系統で生じた負荷変動（需給不均衡）

[問6の標準解答]

系統の電圧降下特性を示す式は、 $V_s = 1.0$ [p.u.], $X = 0.05$ [p.u.] より、

$$V_r = 1.0 - 0.05Q \quad \dots \textcircled{1}'$$

負荷の電圧特性を示す式は、図の遅れ無効電力 100 [%] が 0.5 [p.u.] に相当するので、

$$\text{直線の傾き} : \frac{\Delta Q}{\Delta V} = \frac{(0.7-0.3)}{(1.10-0.90)} = 2.0$$

$$2.0 (V_r - 1.0) = Q - 0.5$$

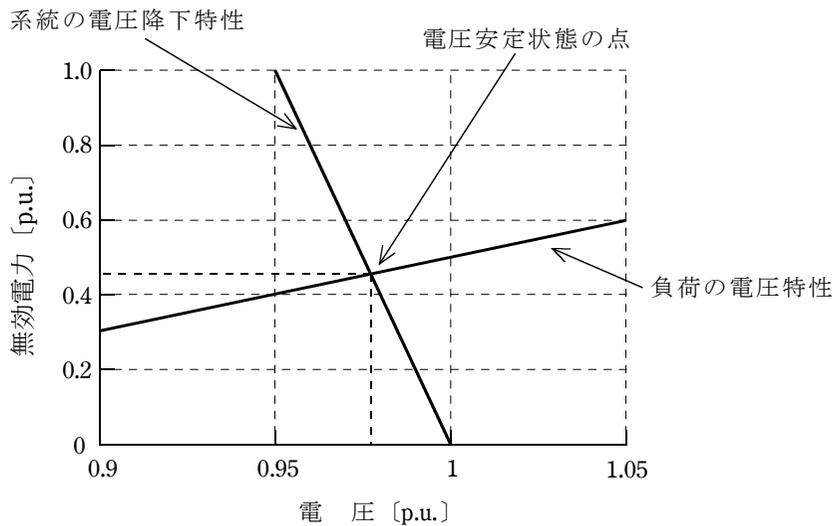
$$\therefore V_r = 0.5Q + 0.75 \quad \dots \textcircled{2}'$$

式①' と ②' の連立方程式を解いて、

$$\text{系統の末端電圧 } V_r = 0.97727 \rightarrow 0.977 \text{ [p.u.]}$$

$$\text{負荷の無効電力 } Q = 0.45454 \rightarrow 45.5 \text{ [MV}\cdot\text{A]}$$

【参考】系統及び負荷の電圧と無効電力が一致する点



<機械・制御科目>

[問 1 の標準解答]

(1) $r_1 + r_2$ [Ω] 及び $x_1 + x_2$ [Ω] は拘束試験の結果から求める。つまり、拘束時の入力インピーダンス Z は、

$$Z = \frac{V_S}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{I_S} = \frac{40}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{22} = 1.04973 \text{ } [\Omega]$$

また、 $r_1 + r_2$ は、

$$r_1 + r_2 = \frac{P_S}{3I_S^2} = \frac{620}{3 \times 22^2} = 0.426997 \rightarrow 0.427 \text{ } [\Omega]$$

したがって、

$$x_1 + x_2 = \sqrt{Z^2 - (r_1 + r_2)^2} = 0.958959 \rightarrow 0.959 \text{ } [\Omega]$$

(2) 極対数を p とすると、全電圧始動（定格周波数）で得られる始動トルク T_N [$\text{N}\cdot\text{m}$] は、

$$T_N = \frac{3p}{2\pi f_N} \cdot \frac{r_2 \left(\frac{V_N}{\sqrt{3}} \right)^2}{(r_1 + r_2)^2 + (x_1 + x_2)^2} \dots\dots\dots \textcircled{1}$$

始動周波数 f_L 、印加電圧 V_L としたときの始動トルク T_L [$\text{N}\cdot\text{m}$] は、

$$T_L = \frac{3p}{2\pi f_L} \cdot \frac{r_2 \left(\frac{V_L}{\sqrt{3}} \right)^2}{(r_1 + r_2)^2 + \left(\frac{f_L}{f_N} \right)^2 (x_1 + x_2)^2} \dots\dots\dots \textcircled{2}$$

$T_N = T_L$ なので、これを整理すると V_L は、

$$V_L = V_N \sqrt{\frac{f_L}{f_N} \cdot \frac{(r_1 + r_2)^2 + \left(\frac{f_L}{f_N} \right)^2 (x_1 + x_2)^2}{(r_1 + r_2)^2 + (x_1 + x_2)^2}} \dots\dots\dots \textcircled{3}$$

となる。

(3) 周波数が f_L のときの始動電流 I_L は、

$$I_L = \frac{\frac{V_L}{\sqrt{3}}}{\sqrt{(r_1+r_2)^2 + \left(\frac{f_L}{f_N}\right)^2 (x_1+x_2)^2}}$$

この式に③式を代入すると

$$\begin{aligned} I_L &= \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{\sqrt{(r_1+r_2)^2 + \left(\frac{f_L}{f_N}\right)^2 (x_1+x_2)^2}} \times V_N \sqrt{\frac{f_L}{f_N} \cdot \frac{(r_1+r_2)^2 + \left(\frac{f_L}{f_N}\right)^2 (x_1+x_2)^2}{(r_1+r_2)^2 + (x_1+x_2)^2}} \\ &= \frac{V_N}{\sqrt{3}} \sqrt{\frac{f_L}{f_N} \cdot \frac{1}{(r_1+r_2)^2 + (x_1+x_2)^2}} = \frac{V_N}{\sqrt{3}Z} \sqrt{\frac{f_L}{f_N}} \dots\dots\dots \text{④} \end{aligned}$$

ただし、 $Z = \sqrt{(r_1+r_2)^2 + (x_1+x_2)^2}$ とした。④式を変形して f_L について解き、数値を代入すると、

$$f_L = \left(\frac{\sqrt{3}ZI_L}{V_N}\right)^2 f_N = \left(\frac{\sqrt{3} \times 1.04973 \times 22}{200}\right)^2 \times 50 = 2.00 \text{ [Hz]}$$

これらと $f_N = 50$, $V_N = 200$ を (2) の③式に代入すると、

$$V_L = 200 \sqrt{\frac{2}{50} \cdot \frac{0.426997^2 + \left(\frac{2}{50}\right)^2 \times 0.958959^2}{0.426997^2 + 0.958959^2}} = 16.3363 \rightarrow 16.3 \text{ [V]}$$

[問2の標準解答]

(1) 変圧器三相電力を P とすると、接続法に関係なく次式で計算される。

$$P = \sqrt{3} \times \text{線間電圧} \times \text{線電流} \quad \dots\dots\dots \text{①}$$

単相変圧器 2 台を用いた V 結線の場合には変圧器 1 台当たりの設備容量を $P_{1\phi}$ とすると相電流の代わりに線電流が流れるので、三相としての設備容量 P_V は、次式で計算される。

$$P_V = 2 \times P_{1\phi} = 2 \times \text{線間電圧} \times \text{線電流} \quad \dots\dots\dots \text{②}$$

したがって、単相変圧器 2 台を用いた V 結線の場合の利用率は

$$\frac{P}{P_V} = \frac{\sqrt{3}}{2} = 0.866$$

となる。

(2) 単相変圧器 3 台が Δ 結線での運転中、1 台の単相変圧器が故障したのでこれを除いて残り 2 台で V 結線に変更した場合、三相としての容量は次のようになる。

(a) 故障前 Δ 結線での容量：

$$P_A = \sqrt{3} \times \text{線間電圧} \times \text{線電流} = 3 \times \text{線間電圧} \times \text{相電流} \quad \dots\dots \text{③}$$

(b) 故障後 V 結線での容量：

$$P_B = \sqrt{3} \times \text{線間電圧} \times \text{線電流} = \sqrt{3} \times \text{線間電圧} \times \text{相電流} \quad \dots\dots \text{④}$$

(V 結線では線電流と相電流は等しいから)

したがって、故障後の容量は故障前に比べて $\frac{P_B}{P_A} = \frac{\sqrt{3}}{3} = 0.57735$ 倍となる。

故障前の最大容量は $3 \times 100 = 300$ [kV・A] であるから故障後には $300 \times 0.57735 = 173.21 \rightarrow 173$ [kV・A] となる。

[(2)の別解]

④式を用いて、次のように計算してもよい。

$$\sqrt{3} \times (\text{単相変圧器容量}) = \sqrt{3} \times 100 = 173.21 \rightarrow 173 \text{ [kV・A]} \quad \dots \text{⑤}$$

(3) 長所及び短所の回答例

下記のような解答が、いずれか1項目ずつ記載されていればよい。

●長所

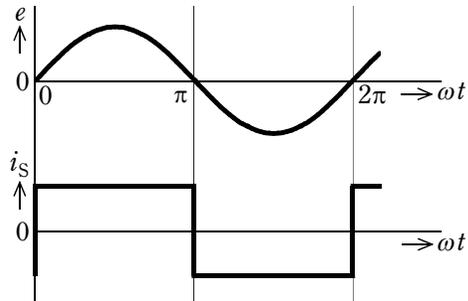
- ・鉄心材料の使用量が少なく、鉄損も少なくなるので効率が良い。
- ・使用材料が少なくて済むので質量が減少し、設置スペースや材料費も節約される。(質量が減少、設置スペースが節約及び経済的だけでも正解とする。)
- ・高電圧結線が外箱内でできるので、ブッシングが少なくできる。

●短所

- ・一相だけ故障しても三相平衡回路が成立しないので、変圧器全体が使用できなくなる。
- ・予備変圧器として三相変圧器バンクの場合には単相変圧器1台を予備とすればよいが、三相変圧器の場合には三相変圧器1台を予備としなくてはならないので、設置バンク数が少ないときには予備変圧器が割高となる。

[問3の標準解答]

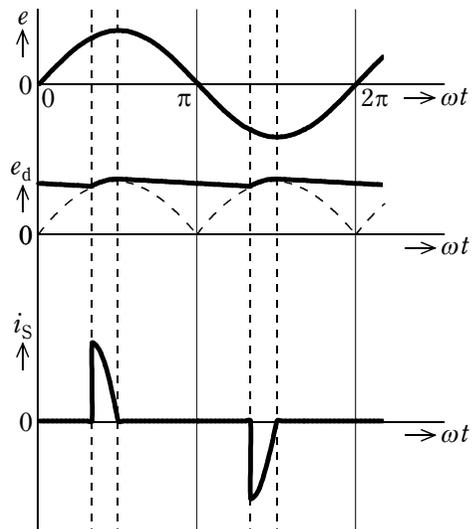
(1) 交流電圧 e , 交流電流 i_S の波形は次のとおりである。



負荷抵抗に印加される平均直流電圧 E_{d1} は, 平滑リアクトルにかかる平均直流電圧は零であるから, 次のように求められる。

$$E_{d1} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \sqrt{2}E \sin \omega t d\omega t = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} E = 0.90032E \rightarrow 0.9E \text{ [V]}$$

(2) 交流電圧 e , 直流電圧 e_d , 代表的な交流電流 i_S の波形は次のとおりである。

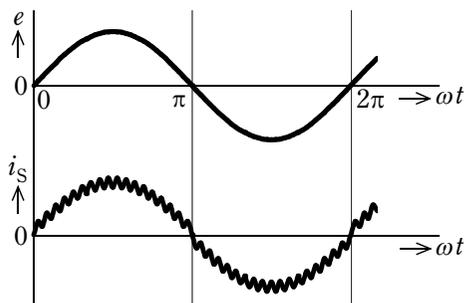


抵抗負荷がないときの平均直流電圧 E_{d2} は，交流電圧のピーク値で充電されている。したがって，

$$E_{d2} = \sqrt{2}E \text{ [V]}$$

直流電流が増えると，充電と放電がつりあうところまで平均直流電圧は低下する。

(3) 交流電圧 e ，交流電流 i_s の波形の例は次のとおりである。



全波整流回路の出力から負荷に供給される直流電圧を得る動作は，昇圧チョップの動作と同じであるので，全波整流回路の直流出力電圧よりも負荷に供給される直流電圧のほうが高いと正常な動作となる。

[問4の標準解答]

(1) 状態空間表現

図1より,

$$X_1(s) = \frac{1}{s-1} U(s) \Rightarrow \dot{x}_1(t) - x_1(t) = u(t) \Rightarrow \dot{x}_1(t) = x_1(t) + u(t)$$

$$X_2(s) = \left(1 - \frac{5}{s+4}\right) X_1(s) \Rightarrow \dot{x}_2(t) + 4x_2(t) = \dot{x}_1(t) - x_1(t)$$

$$\Rightarrow \dot{x}_2(t) + 4x_2(t) = x_1(t) + u(t) - x_1(t) \Rightarrow \dot{x}_2(t) = -4x_2(t) + u(t)$$

が成り立つ。以上をまとめると

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} u(t) \quad \dots\dots\dots \textcircled{1}$$

$$y(t) = [0 \quad 1] \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots \textcircled{2}$$

が得られる。

これより,

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -4 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{b} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{c}^T = [0, 1]$$

が得られる。

(2) 可制御性，可観測性及び安定性

可制御性に関しては，①式より可制御行列のランクを計算すると

$$\text{rank}[\mathbf{b} \quad \mathbf{Ab}] = \text{rank} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -4 \end{bmatrix} = 2$$

となり，可制御であることがいえる。

一方，可観測性に関しては，①及び②式より，可観測行列のランクを計算すると

$$\text{rank} \begin{bmatrix} \mathbf{c}^T \\ \mathbf{c}^T \mathbf{A} \end{bmatrix} = \text{rank} \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -4 \end{bmatrix} = 1 (\neq 2)$$

となり，不可観測(可観測ではない)であることがいえる。

最後に，安定性に関しては，①式の行列 \mathbf{A} の固有値を計算すると

$$\det[\lambda \mathbf{I} - \mathbf{A}] = \det \begin{bmatrix} \lambda - 1 & 0 \\ 0 & \lambda + 4 \end{bmatrix} = (\lambda - 1)(\lambda + 4) = 0$$

となり， $\lambda = 1$ ， $\lambda = -4$ が得られ，固有値が複素右半面に 1 個存在することから不安定であることがいえる。

(3) 安定性の条件

図 2 より, 特性方程式は

$$1 + K \left(1 + \frac{2}{s} \right) \cdot \frac{3s+7}{(s-1)(s+4)} = 0$$
$$\Rightarrow s^3 + 3(K+1)s^2 + (13K-4)s + 14K = 0 \quad \dots\dots\dots \textcircled{3}$$

ラウス表を作ると

s^3	1	$13K-4$	
s^2	$3(K+1)$	$14K$	
s^1	$\frac{3(K+1)(13K-4)-14K}{3(K+1)}$		0
s^0	$14K$		

となり, 安定条件は

$$K > -1, K > 0, K > \frac{4}{13} \doteq 0.31 \quad \dots\dots\dots \textcircled{4}$$

$$39K^2 + 13K - 12 > 0 \quad \dots\dots\dots \textcircled{5}$$

である。⑤式の二次不等式より

$$K < \frac{-13 - \sqrt{2041}}{78} \quad \text{または} \quad K > \frac{-13 + \sqrt{2041}}{78} \doteq 0.41 \quad \dots\dots\dots \textcircled{6}$$

が得られ, 以上をまとめると, ④式の下限と⑥式の下限を比較することにより, 安定条件は

$$K > \frac{-13 + \sqrt{2041}}{78}$$

となる。

(4) 定常偏差の計算

目標値から偏差までの伝達関数を求めると

$$E(s) = \frac{1}{1 + K\left(1 + \frac{2}{s}\right) \cdot \frac{3s+7}{(s-1)(s+4)}} R(s) \quad \dots\dots\dots ⑦$$

となる。定常偏差を最終値の定理を用いて求めると

$$\begin{aligned} \lim_{t \rightarrow \infty} e(t) &= \lim_{s \rightarrow 0} sE(s) = \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{s(s-1)(s+4)}{s(s-1)(s+4) + K(s+2)(3s+7)} \frac{1}{s^2} \\ &= -\frac{4}{14K} = -\frac{2}{7K} \quad \dots\dots\dots ⑧ \end{aligned}$$

が得られる