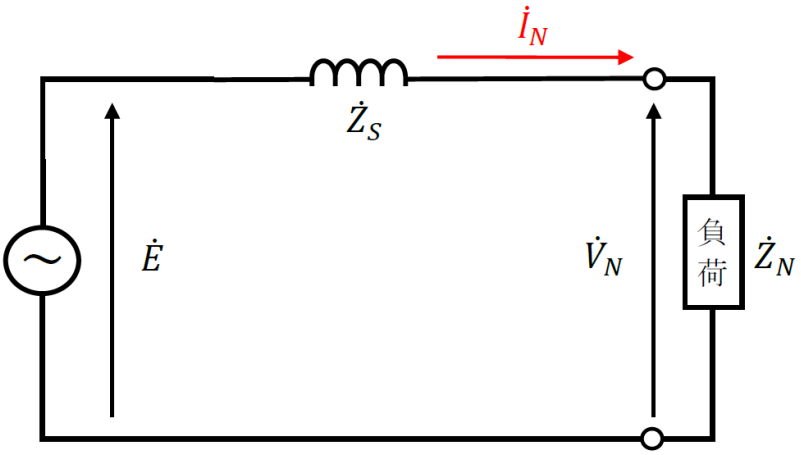
## 機械・制御　問 1

問題文に示す同期発電機について、一相分の等価回路は下図のようになる。




(1) $P_N$[V・A]を定格容量、$V_N$[V]を定格電圧（一相分）とすると、定格電流$I_N$[A]は、

$$I_N = \frac{P_N}{3V_N} = \frac{5000 \times 10^3}{3 \times \frac{6000}{\sqrt{3}}} \fallingdotseq 481.13 \rightarrow \underline{481\ \mathrm{A}}$$

(2) $I_S$[A]を短絡電流とすると、短絡比$K$は、

$$K = \frac{I_S}{I_N} = \frac{300}{481.13} \fallingdotseq 0.62353 \rightarrow \underline{0.624}$$

(3) 基準インピーダンス$Z_N$[Ω]は、

$$Z_N = \frac{\left(\sqrt{3}V_N\right)^2}{P_N} = \frac{6000^2}{5000 \times 10^3} = \underline{7.20\ \Omega}$$

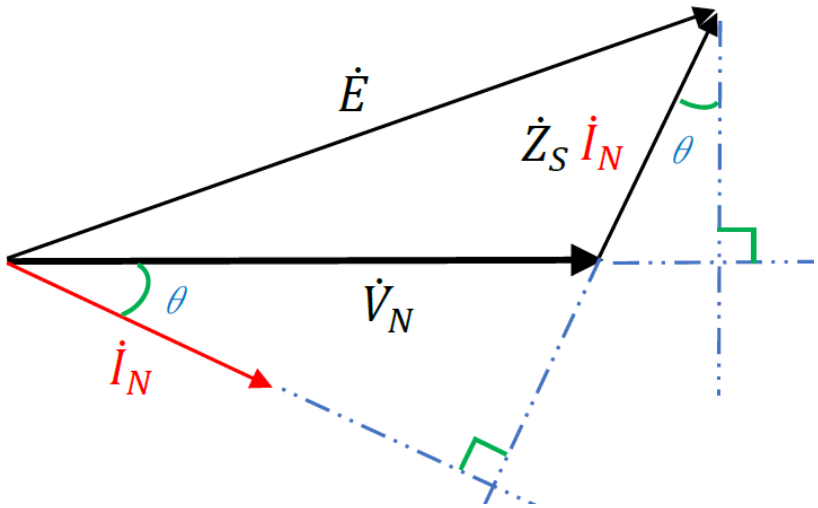
(4) 単位法で表した同期インピーダンス$Z_S$[p.u.]は、

$$Z_S[\mathrm{p.u.}] = \frac{1}{K} = \frac{1}{0.62353} \fallingdotseq 1.6038$$

したがって、同期リアクタンス$Z_S$[Ω]は、 $Z_S[\mathrm{p.u.}] = \frac{Z_S[\Omega]}{Z_N[\Omega]}$の関係より、

$$Z_S = Z_N \times Z_S[\mathrm{p.u.}] = 7.2 \times 1.6038 \fallingdotseq 11.547 \rightarrow \underline{11.5\ \Omega}$$

(5) 無負荷時の誘導起電力（一相分）を$\dot{E}$[V]とすると、電圧の関係を示すベクトル図は下図のようになる。




ベクトル図より、無負荷時の誘導起電力（一相分）の大きさ$E$[V]は、

$$\dot{E} = V_N + Z_S I_N \sin\theta + jZ_S I_N \cos\theta$$

$$= \frac{6000}{\sqrt{3}} + 11.547 \times 481.13 \times 0.43589$$

$$+ j11.547 \times 481.13 \times 0.9 \left(\because \sin\theta = \sqrt{1-\cos^2\theta}\right)$$

$$= 3464.1 + 2421.6 + j5000.0$$

$$= 5885.7 + j5000.0$$

$$E = \sqrt{5885.7^2 + 5000^2}$$

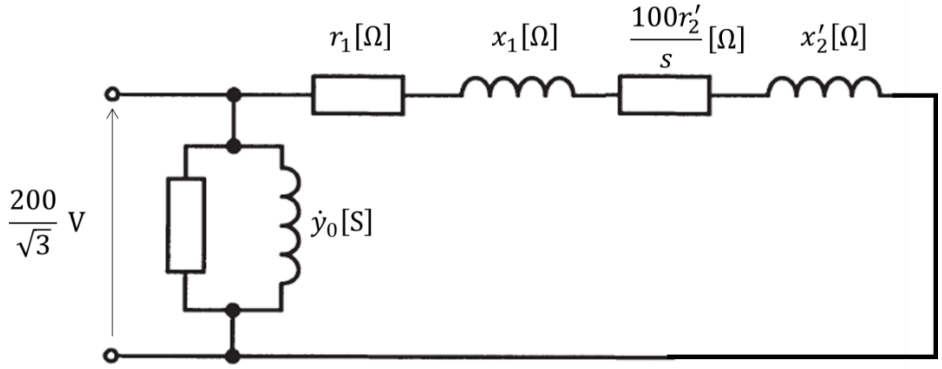
$$\fallingdotseq 7722.8\ \mathrm{V}$$

したがって、定格状態で運転しているときの電圧変動率$\varepsilon$[%]は、

$$\varepsilon = \frac{E - V_N}{V_N} \times 100 = \frac{7722.8 - 3464.1}{3464.1} \times 100 \fallingdotseq 122.94 \rightarrow \underline{123\ \%}$$

## 機械・制御　問 2

(1)1 相分の等価回路図を以下に示す。




周波数を$f$[Hz]、極数を$p$とすると、電動機の滑り$s$[%]は、

$$1455 = \left(1 - \frac{s}{100}\right) \times \frac{120f}{p}$$

$$= \left(1 - \frac{s}{100}\right) \times \frac{120 \times 50}{4}$$

$$\therefore s = \underline{3.00\ \%}$$

(2)相電圧$\frac{200}{\sqrt{3}}$ Vをベクトルの基準とすると、励磁電流$\dot{I}_0$[A]は、

$$\dot{I}_0 = \frac{200}{\sqrt{3}}\dot{y}_0$$

$$= \frac{200}{\sqrt{3}}(0.05 - \mathrm{j}0.1)$$

$$\fallingdotseq 5.7735 - \mathrm{j}11.5470 \cdots ①$$

$$\rightarrow \underline{5.77 - \mathrm{j}11.5\ \mathrm{A}}$$

(3)(1)の図と(1)の結果より、二次電流の一次換算値$\dot{I}_2'$[A]は、

$$\dot{I}_2' = \frac{\frac{200}{\sqrt{3}}}{\left(r_1 + \frac{100r_2'}{s}\right) + \mathrm{j}(x_1 + x_2')}$$

$$= \frac{\frac{200}{\sqrt{3}}}{\left(0.1 + \frac{100 \times 0.15}{3.0}\right) + \mathrm{j}(0.3 + 0.5)}$$

$$= \frac{\frac{200}{\sqrt{3}}}{5.1 + \mathrm{j}0.8}$$

$$= \frac{\frac{200}{\sqrt{3}}}{5.1^2 + 0.8^2} \times (5.1 - \mathrm{j}0.8)$$

$$\fallingdotseq 22.0974 - \mathrm{j}3.4662 \cdots ②$$

$$\rightarrow \underline{22.1 - \mathrm{j}3.47\ \mathrm{A}}$$

(4)(3)の結果より、銅損$P_\mathrm{c}$[W]は、

$$P_\mathrm{c} = 3(r_1 + r_2')\left|\dot{I}_2'\right|^2$$
$$= 3 \times 0.25 \times (22.097^2 + 3.4662^2)$$
$$\fallingdotseq 375.21 \ \rightarrow 375\ \mathrm{W}$$

(5)式①②より、入力電流$\dot{I}_1$[A]は、

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + \dot{I}_2'$$
$$= (5.7735 - \mathrm{j}11.5470) + (22.0974 - \mathrm{j}3.4662)$$

$$\fallingdotseq 27.871 - 15.013\ \mathrm{A} \cdots ③$$

したがって、

$$I_1 = \sqrt{27.871^2 + 15.013^2}$$
$$\fallingdotseq 31.657 \ \rightarrow \ \underline{31.7\ \mathrm{A}}$$

(6)式③より、求める力率[%]は、

$$\frac{27.871}{\sqrt{27.871^2 + 15.013^2}} \times 100 \fallingdotseq 88.04 \ \rightarrow \ \underline{88.0\ \%}$$

## 機械・制御　問３

(1)直流平均電圧$E_{\mathrm{d}}$[V]は、題意より三相整流電圧の平均値となるから、

$$
\begin{aligned}
E_{\mathrm{d}} &= \frac{1}{\frac{\pi}{3}}\int_{\frac{\pi}{3}}^{\frac{2}{3}\pi} 220\sqrt{2}\sin\omega t\,\mathrm{d}\omega t \\
&= \frac{3\cdot 220\sqrt{2}}{\pi}\left[-\cos\omega t\right]_{\frac{\pi}{3}}^{\frac{2}{3}\pi} \\
&= -\frac{3\cdot 220\sqrt{2}}{\pi}\left(\cos\frac{2}{3}\pi - \cos\frac{\pi}{3}\right) \\
&= \frac{3\cdot 220\sqrt{2}}{\pi} \\
&\fallingdotseq 297.10 \rightarrow \underline{297\ \mathrm{V}}
\end{aligned}
$$

(2)有効電力$P = 10\ \mathrm{kW}$であるから、直流電流$I_{\mathrm{d}}$[A]は、(1)の$E_{\mathrm{d}}$も用いて、

$$
\begin{aligned}
P &= E_{\mathrm{d}} I_{\mathrm{d}} \\
\therefore I_{\mathrm{d}} &= \frac{P}{E_{\mathrm{d}}} \\
&= \frac{10\times 10^3}{297.10} \\
&\fallingdotseq 33.659 \rightarrow \underline{33.7\ \mathrm{A}}
\end{aligned}
$$

(3)題意より、DCL に流れる直流電流$I_{\mathrm{d}}$は一定であり、交流側の線電流は正負側ともに 1 サイクルの 1/3 期間ずつ u 相,　v 相および w 相で切り替わりながら流れる。

加えて、三相ダイオード整流器は力率 1 で運転していることから、交流電源電流$i_{\mathrm{a}}$の基本波実効値$I_{\mathrm{a}}$[A]は、

$$
\begin{aligned}
I_{\mathrm{a}} &= \sqrt{\frac{1}{\pi}\int_{0}^{\frac{2}{3}\pi} I_{\mathrm{d}}^2\,\mathrm{d}t} \\
&= \sqrt{\frac{1}{\pi}\left(I_{\mathrm{d}}^2 \times \frac{2}{3}\pi\right)} \\
&= \sqrt{\frac{2}{3}} \times I_{\mathrm{d}}
\end{aligned}
$$

$$= \sqrt{\frac{2}{3}} \times 33.659$$

$$= 27.482 \rightarrow \underline{27.5\ \mathrm{A}}$$

(4)題意より信号波の振幅は 0.9，キャリア波の振幅は 1 であるから、それらの比である変調率$K$は、

$$K = \frac{0.9}{1} = 0.9$$

直流電圧$E_\mathrm{d}$の中点の電圧は$\frac{E_\mathrm{d}}{2}$であり、そこからみたインバータ出力相電圧$v_\mathrm{u}$の波高値$V_\mathrm{up}$[V]は、

$$V_\mathrm{up} = \frac{E_\mathrm{d}}{2} \times K$$

$$= \frac{297.10}{2} \times 0.9$$

$$= 133.695 \rightarrow \underline{134\ \mathrm{V}}$$

(5)求めるインバータの u-v 相線間電圧の基本波実効値$V_\mathrm{uve}$[V]は、(4)で求めた相電圧波高値$V_\mathrm{up}$の$\frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}}$倍（線間電圧= $\sqrt{3}$ ×相電圧、実効値= $\frac{\text{波高値}}{\sqrt{2}}$の関係から）として、

$$V_\mathrm{uve} = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} V_\mathrm{up}$$

$$= \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} \times 133.695$$

$$\fallingdotseq 163.74 \rightarrow \underline{164\ \mathrm{V}}$$

(6)$V/f$一定制御で出力周波数を 50 Hz→25 Hz にする場合、50 Hz 時の信号波の振幅を$V^*_\mathrm{u50}$，25 Hz 時の信号波の振幅を$V^*_\mathrm{u25}$とすれば、次の関係がある。

$$\frac{V^*_\mathrm{u50}}{50} = \frac{V^*_\mathrm{u25}}{25}$$

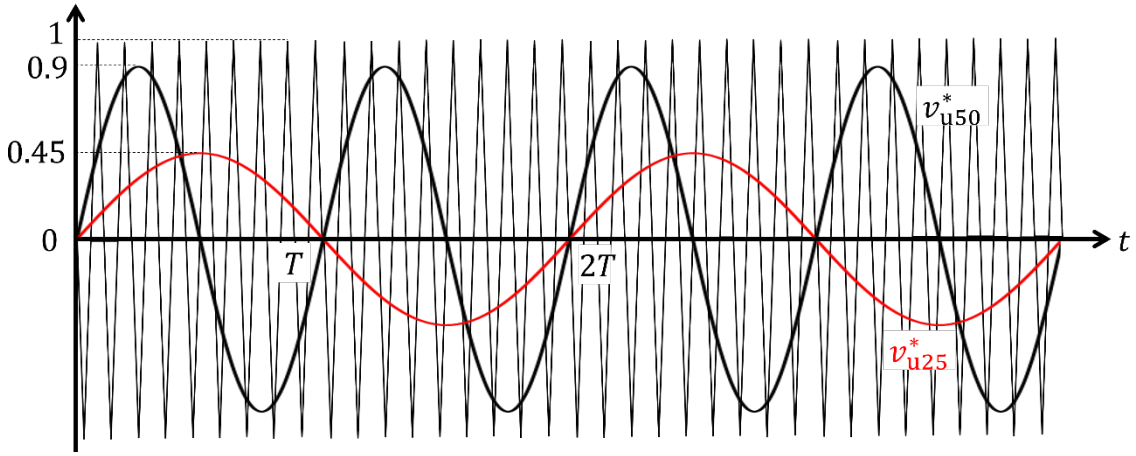
$$\therefore V^*_\mathrm{u25} = \frac{1}{2} V^*_\mathrm{u50}$$

上式より、信号波$v^*_\mathrm{u25}$の振幅は$v^*_\mathrm{u50}$の半分になる。

また、$v^*_\mathrm{u50}$の周期を$T\left(= \frac{1}{50}\mathrm{s}\right)$とすると、周波数が 50 Hz→25 Hz と$\frac{1}{2}$になった場合、周期

は 2 倍となる。したがって、$v_{\mathrm{u25}}^{*}$の周期は$2T\left(=\frac{1}{25}\mathrm{s}\right)$となる。

以上を基に、信号波$v_{\mathrm{u25}}^{*}$の波形を図示すると、下図の赤線のようになる。



## 機械・制御　問 4

(1) フィードバック制御系の特性方程式を求める。

$R(s)$から$Y(s)$までの伝達関数を W(s)とすると

$$W(s)=\frac{\frac{K}{s}\cdot\frac{100}{(s+1)(s+40)}}{1+\frac{K}{s}\cdot\frac{100}{(s+1)(s+40)}}=\frac{100K}{s(s+1)(s+40)+100K}=\frac{100K}{s^3+41s^2+40s+100K}$$

特性方程式は$W(s)$の分母を 0 とおいた式であるから、

$$\underline{s^3+41s^2+40s+100K=0}$$

(2) フィードバック制御系を安定とする$K$の条件を求める。

ラウスの安定判別法に基づいて配列表を書くと

| | | |
|---|---|---|
| $s^3$ | 1 | 40 |
| $s^2$ | 41 | 100K |
| $s$ | $\frac{41\times40-1\times100K}{41}$ | |
| $s^0$ | 100K | |

安定条件は第 1 列の符号が変化しないことなので、

$$41\times40-1\times100K>0\cdots①$$

$$100K>0\cdots②$$

を同時に満たす必要がある。式①より、

$$1640-100K>0$$
$$K<16.4$$

また式②より、

$$K>0$$

以上のことから、安定となる$K$の条件は

$$\underline{0<K<16.4}$$

(3) 目標値$R(s)$から制御偏差$E(s)$までの伝達関数$T_{ER}(s)$を求める。

$$R(s) - E(s)\left\{\frac{K}{s}\cdot\frac{100}{(s+1)(s+40)}\right\} = E(s)$$

$$R(s) = E(s)\left\{1 + \frac{K}{s}\cdot\frac{100}{(s+1)(s+40)}\right\}$$

$$\therefore T_{ER}(s) = \frac{E(s)}{R(s)} = \frac{1}{1 + \frac{K}{s}\cdot\frac{100}{(s+1)(s+40)}}$$

$$= \frac{s(s+1)(s+40)}{s(s+1)(s+40) + 100K}$$

$$= \underline{\frac{s^3 + 41s^2 + 40s}{s^3 + 41s^2 + 40s + 100K}}$$

(4) 最終値の定理を用いて、定常速度偏差$e_{\mathrm{V}}$を求める。

ランプ変化の時間関数は

$$r(t) = 2t$$

と表される。これをラプラス変換すると

$$R(s) = \frac{2}{s^2}$$

最終値の定理によって定常速度偏差を求めると、

$$\lim_{s\to 0} s\cdot T_{ER}(s)R(s) = s\cdot\frac{s^3 + 41s^2 + 40s}{s^3 + 41s^2 + 40s + 100K}\cdot\frac{2}{s^2}$$

$$= \lim_{s\to 0}\frac{2s^2 + 82s + 80}{s^3 + 41s^2 + 40s + 100K} = \frac{80}{100K} = \frac{4}{5K}$$

$K = 2$より、

$$\frac{4}{5K} = \frac{4}{5\times 2} = \underline{\frac{2}{5}}$$

(5) $K = 2$より、$T_{ER}(s)$は

$$T_{ER}(s) = \frac{s^3 + 41s^2 + 40s}{s^3 + 41s^2 + 40s + 200}$$

目標値の$2\sin t$は角周波数が 1 で大きさが 2 の波形である。その時の応答のゲインは、周波数伝達関数を使って$T_{ER}(\mathrm{j}\omega)$を使って求めることができるのでこれを利用する。

$$T_{ER}(\mathrm{j}\omega) = \frac{(\mathrm{j}\omega)^3 + 41(\mathrm{j}\omega)^2 + 40(\mathrm{j}\omega)}{(\mathrm{j}\omega)^3 + 41(\mathrm{j}\omega)^2 + 40(\mathrm{j}\omega) + 200}$$

$$= \frac{-\mathrm{j}\omega^3 - 41\omega^2 + 40\mathrm{j}\omega}{-\mathrm{j}\omega^3 - 41\omega^2 + 40\mathrm{j}\omega + 200}$$

$$= \frac{-41\omega^2 + \mathrm{j}\omega(40 - \omega^2)}{200 - 41\omega^2 + \mathrm{j}\omega(40 - \omega^2)}$$

角周波数$\omega = 1$より、

$$T_{ER}(\mathrm{j} \times 1) = \frac{-41 + \mathrm{j}39}{200 - 41 + \mathrm{j}39} = \frac{-41 + \mathrm{j}39}{159 + \mathrm{j}39}$$

これの絶対値が入力に対するゲインとなる。

$$|T_{ER}(\mathrm{j} \times 1)| = \left|\frac{-41 + \mathrm{j}39}{159 + \mathrm{j}39}\right| = \frac{\sqrt{(-41)^2 + 39^2}}{\sqrt{(159)^2 + 39^2}} = \sqrt{\frac{3202}{26802}} = 0.34564$$

入力の振幅は$r(t) = 2\sin t$より、2なので求める振幅$B$は

$$B = 2 \times 0.34564 = 0.69128 \rightarrow \underline{0.691}$$