平成 30 年

電力・管理科目

NO.	論点	分類
問 1	水力発電所の出力に関する計算問題	水力
問 2	変電所母線などの結線方式に関する論説問題	変電
問 3	電力円線図と無効電力損失に関する計算問題	送電
問 4	地中配電系統に関する論説問題	配電
問 5	高調波電流に関する計算問題	送電
問 6	中性点接地方式に関する論説問題	電気施設管理

機械・制御科目

NO.	論点	分類
問 1	三相かご形誘導電動機の始動方式に関する論説問題	回転機
問 2	同期発電機の特性に関する計算問題	回転機
問 3	三相サイリスタ変換装置に関する計算問題	パワーエレクトロニクス
問 4	2 自由度制御系に関する計算問題	自動制御

平成 29 年

電力・管理科目

NO.	論点	分類
問 1	ガスタービン主体に構成されるコンバインドサイクル発電プラントに関する論説問題	火力
問 2	電力系統の過渡安定度向上対策に関する論説問題	送電
問 3	送電線の電圧変動率に関する計算問題	送電
問 4	配電線間の潮流に関する計算問題	配電
問 5	高圧配電系統に関する論説問題	配電
問 6	変電所の定期点検及び GIS の点検に関する論説問題	電気施設管理

機械・制御科目

NO.	論点	分類
問 1	三相円筒形同期発電機に関する計算及び論述問題	回転機
問 2	単巻変圧器に関する計算問題	変圧器
問 3	単相ダイオード整流器に関する計算問題	パワーエレクトロニクス
問 4	RLC 直列回路の伝達関数に関する計算問題	自動制御

【正答チェック表】

日にち	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)

【ワンポイント解説】

3 種の法規科目の電気施設管理でも定番となっている力率改善に関する問題です。

難解な公式を使用しませんが，計算量が若干多いため，計算間違いに注意して解くようにしましょう。

1.有効電力 P と無効電力 Q

抵抗で消費される電力を有効電力 P とリアクタンスで消費もしくは供給される電力を無効電力 Q と呼び，図 3 のようにベクトル図を描きます。さらに，有効電力 P と無効電力 Q のベクトル和は皮相電力 S と呼ばれ，

$$S = \sqrt{P^2+Q^2}$$

の関係があります。図 3 において，力率は $\cos\theta$ で定義され，

$$\cos\theta = \frac{P}{S}$$

となります。

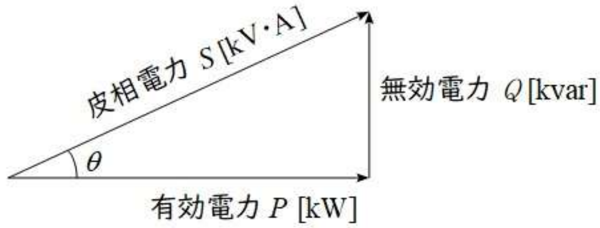

図 3

【解答】

(1)力率改善用コンデンサの容量 Q_2 [kvar] とそのときの総合力率 $\cos\theta_S$

容量 $P_1 = 6\,000$ kW で力率 $\cos\theta_1 = 0.8$（遅れ）の負荷及び容量 $P_2 = 4\,500$ kW で力率 $\cos\theta_2$=0.6 （遅れ）の負荷の無効電力 Q_{P1} [kvar] 及び Q_{P2} [kvar] は，ワンポイント解説「2.有効電力 P と無効電力 Q 」より，

$$\begin{aligned}
Q_{P1} &= P_1\tan\theta_1 \\
&= P_1\cdot\frac{\sin\theta_1}{\cos\theta_1} \\
&= P_1\cdot\frac{\sqrt{1-\cos^2\theta_1}}{\cos\theta_1} \\
&= 6000\times\frac{\sqrt{1-0.8^2}}{0.8} \\
&= 6000\times\frac{0.6}{0.8} \\
&= 4500\ [\text{kvar}] \\
Q_{P2} &= P_2\tan\theta_2 \\
&= P_2\cdot\frac{\sin\theta_2}{\cos\theta_2} \\
&= P_2\cdot\frac{\sqrt{1-\cos^2\theta_2}}{\cos\theta_2} \\
&= 4500\times\frac{\sqrt{1-0.6^2}}{0.6} \\
&= 4500\times\frac{0.8}{0.6} \\
&= 6000\ [\text{kvar}]
\end{aligned}$$

となる。変圧器が過負荷にならないためには，接続しているすべての負荷及び力率改善用コンデンサの合計容量が $P_T = 12\,000$ kV･A よりも小さくならなければならないので，

$$\sqrt{(P_1+P_2)^2+(Q_{P1}+Q_{P2}-Q_1-Q_2)^2} = P_T$$

$$(P_1+P_2)^2+(Q_{P1}+Q_{P2}-Q_1-Q_2)^2 = P_T^2$$

$$(Q_{P1}+Q_{P2}-Q_1-Q_2)^2 = P_T^2-(P_1+P_2)^2$$

$$Q_{P1}+Q_{P2}-Q_1-Q_2 = \sqrt{P_T^2-(P_1+P_2)^2}$$

$$Q_2 = Q_{P1}+Q_{P2}-Q_1-\sqrt{P_T^2-(P_1+P_2)^2}$$

となり，各値を代入すると，

Q_2

$= 4500+6000-2000-\sqrt{12000^2-(6000+4500)^2}$

$\fallingdotseq 8500-5809.5$

$= 2690.5$ [kvar]

と求められる。したがって，過負荷にならないためには，2 700 [kvar] 必要となる。また，このときの総合力率 $\cos\theta_S$ は，皮相電力が変圧器容量 $P_T = 12\,000$ [kV･

(3)出力周波数に対して 3 の整数倍次数の高調波が含まれている波形

図 2-2 より，v_{RO} の波形は，

$$v_{\mathrm{RO}}=\begin{cases}\dfrac{E_{\mathrm{d}}}{2}(0<\theta\leqq\pi)\\-\dfrac{E_{\mathrm{d}}}{2}(\pi<\theta\leqq 2\pi)\end{cases}$$

である。ワンポイント解説「1.フーリエ級数展開」より，フーリエ級数は，

$$v_{\mathrm{RO}}=a_0+\sum_{n=1}^{\infty}(a_n\cos n\theta+b_n\sin n\theta)\quad\cdots①$$

$$a_0=\frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi}v_{\mathrm{RO}}\mathrm{d}\theta\quad\cdots②$$

$$a_n=\frac{1}{\pi}\int_0^{2\pi}v_{\mathrm{RO}}\cos n\theta\,\mathrm{d}\theta\quad\cdots③$$

$$b_n=\frac{1}{\pi}\int_0^{2\pi}v_{\mathrm{RO}}\sin n\theta\,\mathrm{d}\theta\quad\cdots④$$

で与えられる。②より，

$$\begin{aligned}a_0&=\frac{1}{2\pi}\left\{\int_0^{\pi}\frac{E_{\mathrm{d}}}{2}\mathrm{d}\theta+\int_{\pi}^{2\pi}\left(-\frac{E_{\mathrm{d}}}{2}\right)\mathrm{d}\theta\right\}\\&=\frac{1}{2\pi}\left(\left[\frac{E_{\mathrm{d}}}{2}\theta\right]_0^{\pi}+\left[-\frac{E_{\mathrm{d}}}{2}\theta\right]_{\pi}^{2\pi}\right)\\&=0\quad\cdots\cdots②'\end{aligned}$$

となる。③より，

$$\begin{aligned}a_n&=\frac{1}{\pi}\int_0^{2\pi}v_{\mathrm{RO}}\cos n\theta\,\mathrm{d}\theta\\&=\frac{1}{\pi}\left\{\int_0^{\pi}\frac{E_{\mathrm{d}}}{2}\cos n\theta\,\mathrm{d}\theta+\int_{\pi}^{2\pi}\left(-\frac{E_{\mathrm{d}}}{2}\cos n\theta\,\mathrm{d}\theta\right)\right\}\\&=\frac{1}{\pi}\left(\left[\frac{E_{\mathrm{d}}}{2n}\sin n\theta\right]_0^{\pi}+\left[-\frac{E_{\mathrm{d}}}{2n}\sin n\theta\right]_{\pi}^{2\pi}\right)\\&=0\quad\cdots\cdots③'\end{aligned}$$

となる。④より，

$$\begin{aligned}b_n&=\frac{1}{\pi}\int_0^{2\pi}v_{\mathrm{RO}}\sin n\theta\,\mathrm{d}\theta\\&=\frac{1}{\pi}\left\{\int_0^{\pi}\frac{E_{\mathrm{d}}}{2}\sin n\theta\,\mathrm{d}\theta+\int_{\pi}^{2\pi}\left(-\frac{E_{\mathrm{d}}}{2}\sin n\theta\,\mathrm{d}\theta\right)\right\}\\&=\frac{1}{\pi}\left(\left[-\frac{E_{\mathrm{d}}}{2n}\cos n\theta\right]_0^{\pi}+\left[\frac{E_{\mathrm{d}}}{2n}\cos n\theta\right]_{\pi}^{2\pi}\right)\\&=\frac{E_{\mathrm{d}}}{2n\pi}(1-2\cos n\pi+\cos 2n\pi)\end{aligned}$$

すなわち，

$$b_n=\begin{cases}\dfrac{2E_{\mathrm{d}}}{n\pi}&(n\text{が奇数の時})\quad\cdots\cdots④'\\0&(n\text{が偶数の時})\quad\cdots\cdots⑤'\end{cases}$$

となる。②′ ～⑤′ を①に代入すると，

$$\begin{aligned}v_{\mathrm{RO}}&=a_0+\sum_{n=1}^{\infty}(a_n\cos n\theta+b_n\sin n\theta)\\&=\frac{2E_{\mathrm{d}}}{\pi}\left(\sin\theta+\frac{1}{3}\sin 3\theta+\frac{1}{5}\sin 5\theta+\cdots\right)\end{aligned}$$

となるので，v_{RO} は 3 の整数倍次数の高調波が含まれていることがわかる。同様に v_{RS} についても求めると，

$$\begin{aligned}a_0&=0\\a_n&=\frac{E_{\mathrm{d}}}{n\pi}\left(\sin\frac{2n\pi}{3}-\sin\frac{5n\pi}{3}\right)\\b_n&=\frac{E_{\mathrm{d}}}{n\pi}\left(1-\cos\frac{2n\pi}{3}-\cos n\pi+\cos\frac{5n\pi}{3}\right)\end{aligned}$$

となり，

$$v_{\mathrm{RS}}=\frac{\sqrt{3}E}{\pi}\left(\cos\theta-\frac{1}{5}\cos 5\theta+\frac{1}{7}\cos 7\theta+\cdots\right)+\frac{3E_{\mathrm{d}}}{\pi}\left(\sin\theta+\frac{1}{5}\sin 5\theta+\frac{1}{7}\sin 7\theta+\cdots\right)$$

と求められ，v_{RS} は 3 の整数倍次数の高調波が含まれないことがわかる。

(4) v_{RS} の実効値

ワンポイント解説「2.平均値と実効値の定義」より，線間電圧 v_{RS} の実効値 E_0 は，

$$\begin{aligned}E_0&=\sqrt{\frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi}v_{\mathrm{RS}}^2\mathrm{d}\theta}\\&=\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\sqrt{\int_0^{\frac{2}{3}\pi}E_{\mathrm{d}}^2\mathrm{d}\theta+\int_{\pi}^{\frac{5}{3}\pi}(-E_{\mathrm{d}})^2\mathrm{d}\theta}\\&=\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\sqrt{\left[E_{\mathrm{d}}^2\theta\right]_0^{\frac{2}{3}\pi}+\left[E_{\mathrm{d}}^2\theta\right]_{\pi}^{\frac{5}{3}\pi}}\\&=\sqrt{\frac{2}{3}}E_{\mathrm{d}}\end{aligned}$$

と求められる。

(5)直流電流の平均値 I_{d}

題意より三相インバータには損失がないので，出力の有効電力と，直流入力の電力は等しい。よって，直流電力 $P=50\ \mathrm{kW}$ は直流電圧 $E_{\mathrm{d}}=200\ \mathrm{V}$ と I_{d} の積となるから，

$$\begin{aligned}I_{\mathrm{d}}&=\frac{P}{E_{\mathrm{d}}}\\&=\frac{50000}{200}\\&=250\ [\mathrm{A}]\end{aligned}$$

と求められる。

$$
\begin{aligned}
\frac{K_2(K_1+4)-K_1}{K_2} &= 0 \\
K_2(K_1+4)-K_1 &= 0 \\
K_2(K_1+4) &= K_1
\end{aligned}
$$

と求められる。

安定限界のとき，制御系の応答は持続的な振動となる。

(4)空欄(a)～(f)に入る数式を $\boldsymbol{F(s)}$， $\boldsymbol{C_1(s)}$， $\boldsymbol{C_2(s)}$， $\boldsymbol{G(s)}$ を用いて表す

③を①及び②に代入すると，

$$R(s)-G(s)U(s)=E(s)\ldots ①''$$

$$F(s)R(s)+C_1(s)E(s)-C_2(s)G(s)U(s)=U(s)\ldots ②''$$

となり，(a)～(d)は求められる。また，②$''$を $U(s)$ について整理すると，

$$
\begin{aligned}
F(s)R(s)+C_1(s)E(s) &= \bigl(1+C_2(s)G(s)\bigr)U(s) \\
U(s) &= \frac{F(s)R(s)+C_1(s)E(s)}{1+C_2(s)G(s)}
\end{aligned}
$$

となり，これを①$''$に代入すると，

$$
\begin{aligned}
R(s)-G(s)\cdot\frac{F(s)R(s)+C_1(s)E(s)}{1+C_2(s)G(s)} &= E(s) \\
[1+C_2(s)G(s)]R(s)-F(s)G(s)R(s)-C_1(s)G(s)E(s) &= [1+C_2(s)G(s)]E(s) \\
[1+C_2(s)G(s)-F(s)G(s)]R(s) &= [1+C_1(s)G(s)+C_2(s)G(s)]E(s) \\
\frac{E(s)}{R(s)} &= \frac{1+C_2(s)G(s)-F(s)G(s)}{1+C_1(s)G(s)+C_2(s)G(s)}
\end{aligned}
$$

となり，(e)，(f)が求められる。

(5) $\boldsymbol{F(s)=4}$， $\boldsymbol{C_1(s)=K_1\left(1+\frac{1}{s}\right)}$， $\boldsymbol{C_2(s)=K_2 s}$， $\boldsymbol{G(s)=\frac{1}{s^2+4}}$ を代入したとき，ランプ状の目標値 $\boldsymbol{r(t)=t}$ に対する定常偏差

(4)の解答式に各値を代入すると，

$$
\begin{aligned}
\frac{E(s)}{R(s)} &= \frac{1+K_2 s\cdot\dfrac{1}{s^2+4}-4\cdot\dfrac{1}{s^2+4}}{1+K_1\left(1+\dfrac{1}{s}\right)\cdot\dfrac{1}{s^2+4}+K_2 s\cdot\dfrac{1}{s^2+4}} \\
&= \frac{s(s^2+4)+K_2 s^2-4s}{s(s^2+4)+K_1(s+1)+K_2 s^2} \\
&= \frac{s^2(s+K_2)}{s^3+K_2 s^2+(K_1+4)s+K_1}
\end{aligned}
$$

となる。ここで， $r(t)=t$ をラプラス変換すると $R(s)=\frac{1}{s^2}$ であるから，これを代入すると，

$$
\begin{aligned}
E(s) &= \frac{s^2(s+K_2)}{s^3+K_2 s^2+(K_1+4)s+K_1}\cdot\frac{1}{s^2} \\
&= \frac{s+K_2}{s^3+K_2 s^2+(K_1+4)s+K_1}
\end{aligned}
$$

となる。ワンポイント解説「3.定常偏差(最終値の定理)」の通り， $\lim_{t\to\infty} f(t)=\lim_{s\to 0} sF(s)$ であるから，

$$
\begin{aligned}
\lim_{s\to 0} sE(s) &= \lim_{s\to 0}\left[s\cdot\frac{s+K_2}{s^3+K_2 s^2+(K_1+4)s+K_1}\right] \\
&= 0
\end{aligned}
$$

と求められる。