

平成20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) 系統周波数が，異常に低下した場合

低圧タービン動翼の共振（振動，損傷）

タービン動翼の固有振動数は共振を避けるため，定格周波数の整数倍からずれるように設計されているが，低周波数運転を行うと，翼長の長い低圧タービン動翼の固有振動数と運転周波数の整数倍とが一致して共振現象を起こし，動翼に過大な応力を与える。その疲労が蓄積するとクラックが発生し，最悪の場合，翼の折損に至る。

発電機・変圧器の過励磁による鉄心等の過熱

発電機や変圧器の鉄心磁束密度は電圧 / 周波数 ( $V/Hz$ ) の値に左右される。周波数が低下すると電圧 / 周波数 ( $V/Hz$ ) の値が大きくなり，励磁電流が増加し磁束密度が増えるため，鉄心内では鉄損が増加し過熱する。また，磁気飽和の程度が過度になると鉄心から近接する導体構造物への漏えい磁束が増加し，うず電流による過熱が発生する。

発電機出力の上昇

タービン调速機は，速度調定率に基づいた出力となるよう，蒸気弁 (CV) 開度を制御している。

周波数が異常に低下した場合，速度調定率に応じて蒸気弁 (CV) は大きく開方向に動作し，その結果，発電機出力が上昇する。

発電機機内冷却能力の低下

回転子に取り付けられている冷却ファンの回転速度低下により冷却能力が低下し，機内温度の上昇や局部過熱を引き起こす。

潤滑油等の油圧低下

タービン軸に直結した主油ポンプの回転数が低下して油圧低下を引き起こすと、軸受の油膜切れによる軸受損傷を引き起こす。また、タービン軸に直結した主油ポンプで制御油も供給している場合は、制御油圧低下によりユニットトリップに至ることもある。

補機能力の低下

循環水ポンプなどの補機類は、誘導電動機により駆動されているため、周波数低下によって回転数が低下し、流量・圧力が低下する。

なお、給水ポンプなど流量・圧力制御されている補機については、流量・圧力を規定値に維持するため、電動機の電流が増えて、電動機の過熱を引き起こす場合がある。

## (2) 系統周波数が、異常に上昇した場合

低圧タービン動翼の共振（振動、損傷）

タービン動翼の固有振動数は共振を避けるため、定格周波数の整数倍からずれるように設計されているが、周波数が異常に上昇した状態で運転を行うと、翼長の長い低圧タービン動翼の固有振動数と運転周波数の整数倍とが一致して共振現象を起こし、動翼に過大な応力を与える。その疲労が蓄積するとクラックが発生し、最悪の場合、翼の折損に至る。

発電機出力の低下

タービン調速機は、速度調定率に基づいた出力となるよう、蒸気弁（CV）開度を制御している。

周波数が異常に上昇した場合、速度調定率に応じて蒸気弁（CV）は大きく閉方向へ動作し、その結果、発電機出力が低下する。

タービン車軸・車室などの熱応力の発生

周波数の上昇に伴い、タービン調速機の速度調定率に応じて蒸気弁（CV）が絞られるため、絞り損失により主蒸気温度が急速に低下し、車室や車軸などに熱応力を生じる。

主蒸気圧力の上昇（プラント制御の乱調）

周波数の上昇に伴い、タービン调速機の色度調定率に応じて蒸気弁(CV)が絞られるため、主蒸気流量が減少する。蒸気流量の減少が急激な場合、あるいは主蒸気流量の減少に対応する燃料流量の絞り込みが十分でない場合は主蒸気圧力が過上昇し、ボイラトリップに至る場合がある。

### (3) 異常な進相運転が行われた場合

固定子鉄心端部の過熱

電機子反作用による端部漏れ磁束は鉄心端から外部に向かい、回転子保持環を通してまた鉄心に戻る。進相運転時は電機子反作用漏れ磁束は多くなる。この磁束は、回転子に対しては静止しているが、固定子に対しては同期速度で回転しているため、固定子鉄心端部及び固定子端部構造物に渦電流損やヒステリシス損が発生し、過熱を引き起こす。

安定度の低下

進相運転時は、低励磁によって発電機内部誘起電圧が低下し、発電機と系統間の電圧相差角が増加し、定態安定度が低下する。なお、自動電圧調整装置（AVR）を使用していれば安定運転領域が拡大され、安定度は向上する。

所内電圧の低下による補機能力の低下

進相運転を行うと、発電機端子電圧が低下するため、所内の母線電圧も低下する。所内母線には多くの補機用電動機がつながっており、電圧が低下するとトルク不足により、流量・圧力が低下する。なお、流量・圧力制御されている補機については、流量・圧力を規定値に維持するため、電動機の電流が増えて電動機の過熱を引き起こす場合がある。

〔問2の標準解答〕

(1) がいし類を多く使用するがいし形機器や変圧器ブッシングは地震に共振する可能性があり、地震に対する動的応答の方が静的水平加速度  $5 \text{ [m/s}^2\text{]} (0.5G)$  よりも厳しい場合が多く、また、過去の地震による被害も静的設計手法により設計されたがいし形機器及び変圧器ブッシングに集中している。したがって、これらの機器を対象に動的設計手法が採用されている。

(2) 屋外用がいし形機器（屋外に設置される開閉装置，計器用変成器及び電力用ケーブルヘッド）の耐震設計に関して，設計手法，設計地震力は次のとおりである。

設計手法：動的設計手法を適用する。

設計地震力：

- ・ 加速度は，水平加速度  $3 \text{ [m/s}^2\text{]} (0.3G)$  とする。
- ・ 波形は，共振正弦 3 波とする。

なお，機器の固有周波数が  $0.5 \text{ [Hz]}$  を下回るとき又は  $10 \text{ [Hz]}$  を上回るときは，設計波形の振動数をそれぞれ  $0.5 \text{ [Hz]}$  又は  $10 \text{ [Hz]}$  とする。

- ・ 印加箇所は，架台下端とする。

(3) 屋外変圧器（ $154 \text{ [kV]}$  以上）の耐震設計に関して，設計手法，設計地震力は次のとおりである。

(3-1) ブッシング

設計手法：動的設計手法を適用する。

設計地震力：

- ・ 加速度は，水平加速度  $5 \text{ [m/s}^2\text{]} (0.5G)$  とする。
- ・ 波形は，共振正弦 3 波とする。
- ・ 印加箇所は，ブッシングポケット下端とする。

(3-2) 変圧器本体（ブッシングを除く部分）

設計手法：静的設計手法を適用する。

設計地震力：

- ・ 静的水平加速度  $5 \text{ [m/s}^2\text{]} (0.5G)$  とする。

〔問3の標準解答〕

- (1) 図2より，事故発生前の $|\dot{V}_{bc}|$ は，110.0〔V〕(PT二次側換算値)事故発生後は，発電機の $\%Z_G$ と送電線の $\%Z_L$ で分されるから，

$$|\dot{V}_{bc}| = 110.0 \times \left| \frac{\%Z_L}{\%Z_G + \%Z_L} \right| = 110.0 \times \left| \frac{j0.150}{j0.900 + j0.150} \right| = 15.71 \text{〔V〕}$$

よって，事故発生後の $|\dot{V}_{bc}|$ は，15.7〔V〕(PT二次側換算値)となる。

- (2) 当該二相短絡事故点からみた正，逆，零相インピーダンス，及び電流を各々 $\dot{Z}_1$ ， $\dot{Z}_2$ ， $\dot{Z}_0$ 並びに $\dot{I}_1$ ， $\dot{I}_2$ ， $\dot{I}_0$ とすると，

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{V}_a}{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2} = \frac{\dot{V}_a}{2(\%Z_G + \%Z_L)} \times 100 \quad \dot{I}_2 = -\dot{I}_1 = \frac{-\dot{V}_a}{2(\%Z_G + \%Z_L)} \times 100 \quad \dot{I}_0 = 0$$

事故電流を $\dot{I}_{2\phi s}$ とすると

$$\dot{I}_{2\phi s} = \dot{I}_b = \dot{I}_0 + a^2 \dot{I}_1 + a \dot{I}_2 = \frac{(a^2 - a)\dot{V}_a}{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2} = \frac{-j\sqrt{3} \times \dot{V}_a}{2(\%Z_G + \%Z_L)} \times 100$$

$$|\dot{I}_{2\phi s}| = \left| \frac{-j\sqrt{3}}{2 \times (j0.900 + j0.150)} \right| = 0.8247 \text{〔p.u.〕}$$

よって，短絡事故電流は0.825〔p.u.〕となる。

- (3)  $\dot{V}_{bc}$ と図2の関係より， $\dot{V}_b = -\frac{63.5}{2} - j\frac{15.7}{2} = -31.75 - j7.85 \text{〔V〕}$ となる。  
500〔kV・A〕，6600〔V〕でのベース電流 $I_{base}$ は

$$I_{base} = \frac{500 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 6600} = 43.74 \text{〔A〕}$$

(2)より $|\dot{I}_b|$ は

$$|\dot{I}_b| = 0.8247 \times 43.74 = 36.07 \text{〔A〕}$$

これを二次側に換算すると  $\frac{36.07 \times 5}{100} = 1.804$  [A] となる。

発電機から事故点までのインピーダンスがリアクタンスであることから、  
短絡電流は  $\dot{V}_{bc}$  に対して 90 度遅れる。

よって、 $\dot{I}_b = -1.80$  [A] となる。

$$(4) (3) \text{より, } 3 \cdot \dot{V}_b \cdot \bar{\dot{I}}_b = 3 \times (-31.75 - j7.85) \times (-1.804) = 171.8 + j42.48$$

今、逆電力リレーの整定値は二次側換算で  $\frac{50 \times 10^3}{60 \times 20} = 41.67$  [W]

よって、リレー入力値 (172 [W]) > リレー整定値 (41.7 [W])  
となることから、今回の送電線事故時に逆電力リレーが検出する電力はリレー  
動作域に入る。

〔問4の標準解答〕

(1) まず架空線を考える。

架空線の直列リアクタンスは  $\dot{X}_L = j0.001 \times 100 = j0.100$  [p.u.]

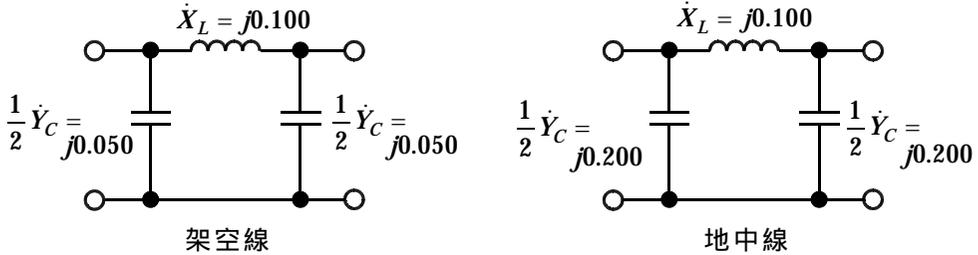
分路アドミタンスは  $\dot{Y}_C = j0.001 \times 100 = j0.100$  [p.u.]

次に地中線を考える。

地中線の直列リアクタンスは  $\dot{X}_L = j0.002 \times 50 = j0.100$  [p.u.]

分路アドミタンスは  $\dot{Y}_C = j0.008 \times 50 = j0.400$  [p.u.]

以上より、単位法で表した架空線、地中線の  $\pi$  形等価回路は下記のとおりとなる。

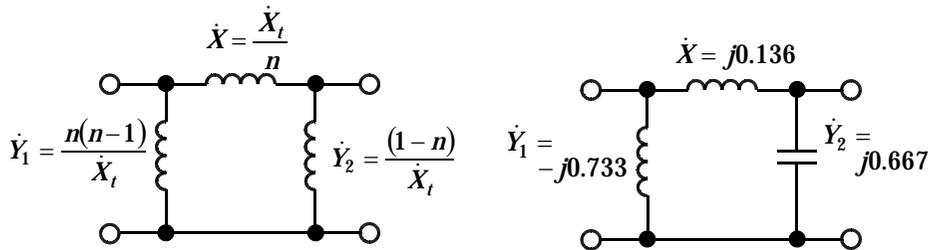


次にタップ付き変圧器を考える。

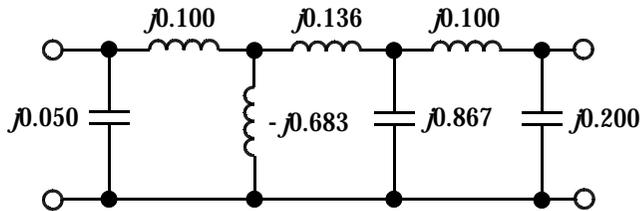
変圧器の容量が 1000 [MV·A] であるため、漏れリアクタンス 15 [%] を系統基準容量 1000 [MV·A] の基準に換算すると、

$$\dot{X}_l = \frac{1000}{1000} \times 0.15 = j0.150 \text{ [p.u.] となる。}$$

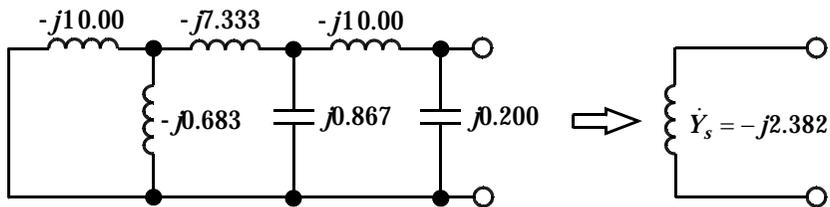
漏れリアクタンスを  $\dot{X}_l$ 、タップ比を  $n$  とすると、 $\pi$  形等価回路は左下図となり、数値を入れると右下図となる。



全体を組み合わせて，下図の送電系統の等価回路を得る。

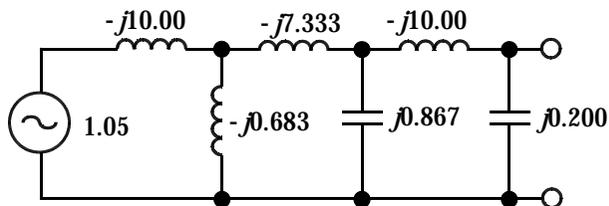


- (2) 短絡電流を表すアドミタンス  $\dot{Y}_s$  は，送電端を短絡したときの負荷端からみたアドミタンスとして下図のように表現できる。なお，下図の素子はすべてアドミタンス表現となっている。

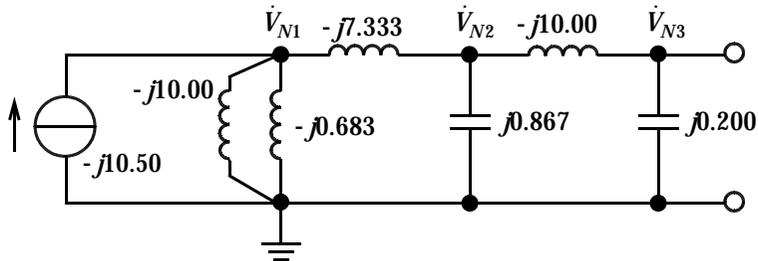


これから短絡電流を表すアドミタンスは， $-j2.38$  [p.u.] となる。

また，無負荷時の負荷端電圧は，次の回路で計算する。なお，送電端の電圧は公称電圧 500 [kV] に対して電圧 525 [kV] より  $\frac{525[\text{kV}]}{500[\text{kV}]} = 1.05$  [p.u.] となる。



節点電圧法による解析回路は下図のとおり。



節点電圧方程式は下式となる。

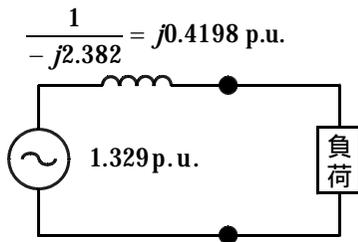
$$\begin{bmatrix} -j10.50 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -j18.02 & j7.333 & 0 \\ j7.333 & -j16.47 & j10.00 \\ 0 & j10.00 & -j9.800 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_{N1} \\ \dot{V}_{N2} \\ \dot{V}_{N3} \end{bmatrix}$$

クラメールの公式から  $\dot{V}_{N3}$  は下式で計算できる。

$$\dot{V}_{N3} = \frac{\begin{vmatrix} -j18.02 & j7.333 & -j10.50 \\ j7.333 & -j16.47 & 0 \\ 0 & j10.00 & 0 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} -j18.02 & j7.333 & 0 \\ j7.333 & -j16.47 & j10.00 \\ 0 & j10.00 & -j9.800 \end{vmatrix}} = \frac{j770.0}{j579.6} = 1.329 + j0$$

よって、無負荷時の負荷端電圧は 1.33 [p.u.] となる。

(3) 上記(2)の計算結果より、負荷を含む送電系統の鳳・テブナンの等価回路は、下図のように表される。



負荷として， $1.0+j0.8$  [p.u.] のインピーダンスが接続されたときの負荷端電圧は，

$$|\dot{V}_L| = \left| \frac{1.329 \times (1.0 + j0.8)}{1.0 + j(0.8 + 0.4198)} \right| = \left| \frac{1.329 + j1.063}{1.0 + j1.2198} \right| = |1.055 - j0.2243| = 1.079$$

よって，重負荷時の負荷端電圧は 1.08 [p.u.] となる。

また， $4.0+j3.2$  [p.u.] のインピーダンスを持つ負荷が接続されたときの負荷端電圧は，

$$|\dot{V}_L| = \left| \frac{1.329 \times (4.0 + j3.2)}{4.0 + j(3.2 + 0.4198)} \right| = \left| \frac{5.316 + j4.253}{4.0 + j3.6198} \right| = |1.260 - j0.0767| = 1.26$$

よって，軽負荷時の負荷端電圧は 1.26 [p.u.] となる。

〔問5の標準解答〕

速度調定率： $R$ は次式で表される。

$$R = \frac{\frac{f_1 - f_0}{f_n}}{\frac{P_0 - P_1}{P_n}}$$

$P_n$ ：定格出力〔MW〕， $f_n$ ：定格周波数〔Hz〕，

$f_0$ ：出力  $P_0$ 〔MW〕のときの周波数〔Hz〕，

$f_1$ ：出力  $P_1$ 〔MW〕のときの周波数〔Hz〕

(1) 周波数

速度調定率  $R = 0.04$ ， $f_n = f_0 = 50$ 〔Hz〕， $P_n = P_0 = 100$ 〔MW〕， $P_1 = 60$ 〔MW〕

を式に代入して，

$$0.04 = \frac{\frac{f_1 - 50}{50}}{\frac{100 - 60}{100}}$$

$$f_1 = 50 + \frac{50 \times 0.04 \times (100 - 60)}{100} = 50.8 \text{〔Hz〕}$$

(2) B号機 の速度調定率

A号機 の脱落前出力を  $P_{0A}$  , 脱落後出力を  $P_{1A}$  として , 式に代入して ,

$$0.04 = \frac{\frac{50.5 - 50}{50}}{\frac{P_{0A} - P_{1A}}{100}}$$

$$P_{0A} - P_{1A} = \frac{50.5 - 50}{50} \times \frac{100}{0.04} = 25$$

B号機 の速度調定率を  $R_B$  , 脱落前出力を  $P_{0B}$  , 脱落後出力を  $P_{1B}$  として , 式に代入して ,

$$R_B = \frac{\frac{50.5 - 50}{50}}{\frac{P_{0B} - P_{1B}}{80}}$$

$$P_{0B} - P_{1B} = \frac{50.5 - 50}{50} \times \frac{80}{R_B} = \frac{0.8}{R_B}$$

式 + 式より ,

$$(P_{0A} + P_{0B}) - (P_{1A} + P_{1B}) = 25 + \frac{0.8}{R_B}$$

$$100 - 60 = 25 + \frac{0.8}{R_B}$$

$$R_B = \frac{0.8}{100 - 60 - 25} = 0.053333 \rightarrow 5.33 \text{ [ \% ]}$$

〔問6の標準解答〕

(1) 一般水力による発電

特徴：自然エネルギーであるために自然条件に左右される面はあるが、海外に依存する必要のない純国産エネルギーという供給安定性，発電時に二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)や硫黄酸化物(SO<sub>x</sub>)等を発生しない環境適合性，燃料を使用しない発電コスト安定性という経済性の特徴がある。

なお、これらのエネルギーは、2003年4月に施行された「電気事業者による新エネルギー等の利用に関する特別措置法」(RPS法)の対象エネルギーとして、その導入・利用が支援され、推進が図られている。

課題：既に一般水力の開発が相当進んでいるため、今後の開発は立地地点の奥地化や小規模化となり、開発コストの上昇が見込まれるため、低落差や小流量に適応した技術の向上が課題である。

(2) 石炭燃料による火力発電

特徴：石炭による火力発電は、供給力の運用上において電力〔kW〕及び電力量〔kW・h〕ともに、長時間継続して運転を行い安定的に電気を供給する電源として重要な役割を果たしてきている。燃料である石炭は海外に依存しているが、世界各国に幅広く分布する等、他の化石燃料に比べ供給国の多様性という供給安定性が高く、大気汚染防止面からは脱硫や脱硝技術などの利用により環境適合性，経済性にも優れているという特徴がある。

課題：石炭は、他の化石燃料に比し、燃焼過程における単位熱量当たりの二酸化炭素排出量が多いこと等、環境への適合を図る観点から課題を抱えている。このための対策技術が必要であり、燃料自体のガス化によるクリーン化，超臨界圧採用による高効率発電，ガスタービンと蒸気タービンを組み合わせて発電する石炭ガス化複合発電(IGCC)等のより効率の高い発電利用技術の開発・導入が課題である。

### (3) 太陽光，風力，バイオマスの新エネルギーによる発電

特徴：新エネルギーのうち，太陽光，風力，バイオマスの再生可能エネルギーは，地域におけるエネルギー自給率の向上，地球温暖化対策に資するほか，分散形エネルギーシステムとしてのメリットや国民がエネルギー供給に参加する機会を与えることもできる貴重なエネルギーである。

なお，これらのエネルギーは，2003年4月に施行された「電気事業者による新エネルギー等の利用に関する特別措置法」(RPS法)の対象エネルギーとして，その導入・利用が支援され，推進が図られている。

課題：当該新エネルギーは，エネルギー密度が一般的には小さく，現時点ではエネルギー変換効率や設備利用率など，競合するエネルギーと比較して，出力の不安定性や高コスト，電力品質の確保等の課題を抱えている。このため，コスト低減や系統安定化，性能向上等の技術開発が課題である。

< 機械・制御科目 >

[ 問 1 の標準解答 ]

(1) 内かご及び外かごのインピーダンス

滑りが  $s$  で運転しているときの内かごのインピーダンス  $\dot{Z}_{is} [\Omega]$  は、回転子が静止しているときの内かごの抵抗を  $r_i [\Omega]$  , リアクタンスを  $x_i [\Omega]$  とすれば

$$\dot{Z}_{is} = \frac{r_i}{s} + j x_i$$

式に ,  $r_i = 0.03 [\Omega]$  ,  $x_i = 3 [\Omega]$  ,  $s = 0.03$  を代入すれば ,

$$\dot{Z}_{is} = \frac{0.03}{0.03} + j3 = 1 + j3 [\Omega]$$

同様にして , 外かごのインピーダンス  $\dot{Z}_{os} [\Omega]$  は ,

$$\dot{Z}_{os} = \frac{0.3}{0.03} + j2 = 10 + j2 [\Omega]$$

(2) 合成インピーダンス

この電動機の回転子回路は , 等価回路に示されるように並列になっているので , 回転子回路の合成インピーダンス  $\dot{Z}_2 = r_2 + jx_2 [\Omega]$  は ,

$$\dot{Z}_2 = \frac{1}{\frac{1}{\dot{Z}_{is}} + \frac{1}{\dot{Z}_{os}}} = \frac{\dot{Z}_{is} \dot{Z}_{os}}{\dot{Z}_{is} + \dot{Z}_{os}}$$

式に ,  $\dot{Z}_{is} = 1 + j3 [\Omega]$  ,  $\dot{Z}_{os} = 10 + j2 [\Omega]$  を代入すれば ,

$$\begin{aligned} \dot{Z}_2 &= \frac{(1 + j3)(10 + j2)}{1 + j3 + 10 + j2} = \frac{4 + j32}{11 + j5} = \frac{(4 + j32)(11 - j5)}{(11 + j5)(11 - j5)} = \frac{204 + j332}{146} \\ &= 1.3972 + j2.2739 \rightarrow 1.40 + j2.27 [\Omega] \end{aligned}$$

(3) 二次電流

回転子回路に流れる電流  $I_2$  [A] は、回転子の電圧を  $E_2$  [V] とすれば、

$$I_2 = \frac{E_2}{Z_2}$$

回転子の合成インピーダンスは、

$$Z_2 = \sqrt{1.3972^2 + 2.2739^2} = 2.6688 \text{ } [\Omega]$$

したがって、式に、 $E_2 = 56$  [V]、 $Z_2 = 2.6688$  [ $\Omega$ ] を代入すれば、

$$I_2 = \frac{56}{2.6688} = 20.983 \rightarrow 21.0 \text{ } [A]$$

(4) 発生トルク

この電動機の同期速度  $n_s$  [ $\text{min}^{-1}$ ] は、定格周波数を  $f$  [Hz]、極数を  $2p$  ( $p$  は極対数) とすれば、

$$n_s = \frac{120 f}{2 p}$$

式に、 $f = 60$  [Hz]、 $2p = 4$  を代入すれば、

$$n_s = \frac{120 \times 60}{4} = 1800 \text{ } [\text{min}^{-1}]$$

一相当たりのトルク  $T_2$  [N·m] は、二次入力を  $P_2$  [W] とすれば、

$$T_2 = \frac{60}{2\pi n_s} \cdot P_2$$

一相当たりの二次入力  $P_2$  [W] は、回転子回路の合成抵抗が  $r_2$  [ $\Omega$ ] なので、

$$P_2 = I_2^2 r_2$$

電動機は三相であるので、電動機のトルク  $T$  [N·m] は、

$$T = 3T_2$$

式～式より，電動機のトルク  $T$  [N・m] は，

$$T = 3 \cdot \frac{60}{2\pi n_s} \cdot I_2^2 r_2$$

式に， $I_2 = 20.983$  [A]， $r_2 = 1.3972$  [ $\Omega$ ]， $n_s = 1800$  [ $\text{min}^{-1}$ ] を代入すれば，

$$T = 3 \times \frac{60}{2 \times 3.14 \times 1800} \times 20.983^2 \times 1.3972 = 9.7956 \rightarrow 9.80 \text{ [N・m]}$$

〔問2の標準解答〕

(1) 一次換算漏れリアクタンス

定格一次電流  $I_1$  [A] は、定格出力を  $P$  [W]、定格一次電圧を  $V_1$  [V] とすれば、

$$I_1 = \frac{P}{V_1} = \frac{50 \times 10^3}{6300} = 7.9365 \text{ [A]}$$

一次換算の等価抵抗(銅損と漂遊負荷損を含めた抵抗)  $R_s$  [ $\Omega$ ] は、短絡試験の結果より、負荷損  $P_{L25} = 298$  [W] であるので、

$$R_s = \frac{P_{L25}}{I_1^2} = \frac{298}{7.9365^2} = 4.7310 \text{ [\Omega]}$$

一次換算インピーダンス  $Z_1$  [ $\Omega$ ] は、短絡試験の結果より、インピーダンス電圧  $V_s = 58$  [V] であるので、

$$Z_1 = \frac{V_s}{I_1} = \frac{58}{7.9365} = 7.3080 \text{ [\Omega]}$$

したがって、一次換算漏れリアクタンス  $X_1$  [ $\Omega$ ] は、

$$X_1 = \sqrt{Z_1^2 - R_s^2} = \sqrt{7.3080^2 - 4.7310^2} = 5.5699 \rightarrow 5.57 \text{ [\Omega]}$$

(漏れリアクタンスは温度には無関係である。)

(2) 負荷損

この変圧器の変圧比  $a$  は、定格二次電圧を  $V_2$  [V] とすれば、

$$a = \frac{V_1}{V_2} = \frac{6300}{210} = 30$$

一次換算等価回路の合成抵抗  $R_1$  [ $\Omega$ ] は、一次巻線の抵抗を  $r_1$  [ $\Omega$ ]、二次巻線の抵抗を  $r_2$  [ $\Omega$ ]、一次回路に換算した二次巻線の抵抗を  $r_{21}$  [ $\Omega$ ] とすれば、

$$R_1 = r_1 + r_{21} = r_1 + a^2 r_2 = 1.18 + 30^2 \times 0.0038 = 4.60 \text{ [\Omega]}$$

したがって、25 [ ] での銅損  $P_{c25}$  [W] は、

$$P_{c25} = I_1^2 R_1 = 7.9365^2 \times 4.60 = 289.74 \text{ [W]}$$

よって、75〔 〕に換算した負荷損  $P_{75}$ 〔W〕は、与えられた換算式を用いて、

$$\begin{aligned} P_{75} &= P_{ct} \left( \frac{310}{235+t} \right) + (P_{Lt} - P_{ct}) \left( \frac{235+t}{310} \right) \\ &= 289.74 \times \left( \frac{310}{235+25} \right) + (298 - 289.74) \left( \frac{235+25}{310} \right) \\ &= 345.4592 + 6.9277 = 352.38 \rightarrow 352 \text{〔W〕} \end{aligned}$$

### (3) 効率

75〔 〕における変圧器の損失  $P_{L75}$ 〔W〕は、負荷損を  $P_{75}$ 〔W〕、鉄損を  $P_i$ 〔W〕とすれば、

$$P_{L75} = P_{75} + P_i$$

無負荷試験の結果から、鉄損  $P_i = 137$ 〔W〕であり、温度に無関係とみなせるので、

$$P_{L75} = 352.38 + 137 = 489.38 \text{〔W〕}$$

この変圧器の出力  $P_0$ 〔W〕は、負荷力率を  $\cos\theta$  とすれば、

$$P_0 = P \cos\theta = 50 \times 10^3 \times 0.8 = 40000 \text{〔W〕}$$

入力  $P_1$ 〔W〕は、

$$P_1 = P_0 + P_{L75} = 40000 + 489.38 = 40489.38 \text{〔W〕}$$

したがって、効率  $\eta$ 〔%〕は、

$$\eta = \frac{P_0}{P_1} \times 100 = \frac{40000}{40489.38} \times 100 = 98.791 \rightarrow 98.8 \text{〔%〕}$$

(4) 電圧変動率

75〔 〕に換算した負荷損より，75〔 〕における百分率抵抗降下  $p_{75}$ 〔 % 〕は，

$$p_{75} = \frac{P_{75}}{P} \times 100 = \frac{352.38}{50 \times 10^3} \times 100 = 0.70476 \text{〔 \% 〕}$$

一方，25〔 〕における百分率リアクタンス降下  $q_{25}$ 〔 % 〕は，

$$q_{25} = \frac{I_1 X_1}{V_1} \times 100 = \frac{7.9365 \times 5.5699}{6300} \times 100 = 0.70167 \text{〔 \% 〕}$$

百分率リアクタンス降下は温度に影響されないので，75〔 〕における百分率リアクタンス降下  $q_{75}$ 〔 % 〕は

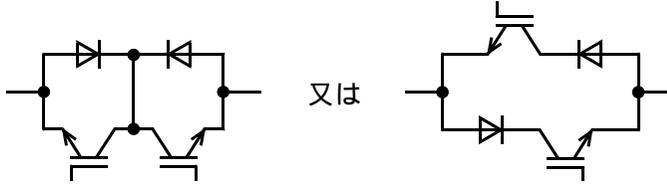
$$q_{75} = q_{25}$$

したがって，電圧変動率  $\varepsilon$ 〔 % 〕は，

$$\begin{aligned} \varepsilon &= p_{75} \cos \theta + q_{75} \sin \theta = 0.70476 \times 0.8 + 0.70167 \times 0.6 \\ &= 0.98481 \rightarrow 0.985 \text{〔 \% 〕} \end{aligned}$$

〔問3の標準解答〕

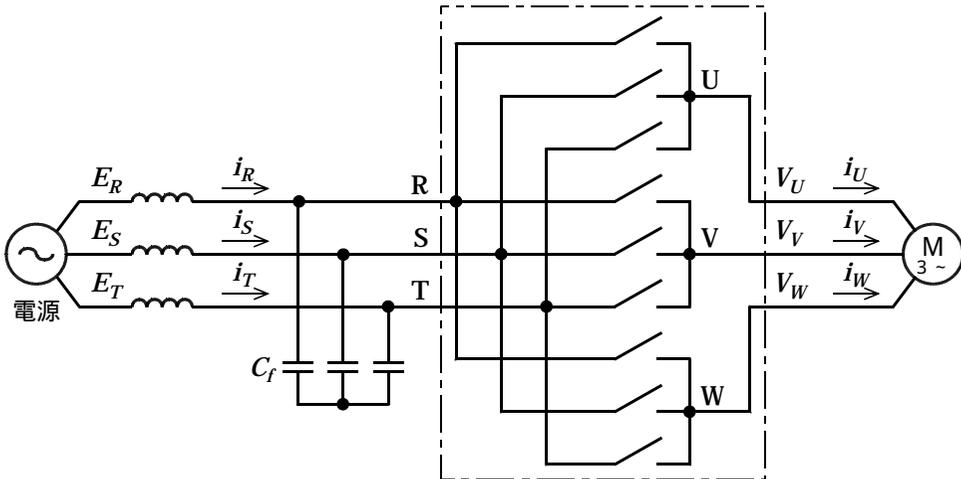
(1) 1アーム分の双方向に流れるバルブデバイスユニット(モジュール)



等, 双方向スイッチ機能を有する回路

(2) マトリックスコンバータ部の接続図

下図の一点鎖線内の図が描いてあればよい。



(3) 特徴

下記の項目のうち, いずれか3項目を解答すればよい。

- ・スイッチング素子には, 自己消弧形の逆阻止特性(複数の素子を用いて同等の機能を発揮してもよい。)を有するものが必要である。また, 双方向スイッチを構成する必要がある。
- ・直流平滑コンデンサや直流平滑リアクトルが不要である。
- ・直流平滑回路がないので小形化しやすい。
- ・主回路に直流平滑回路がないので高速制御が必要である。

〔問4の標準解答〕

(1) 伝達関数を求めるまでの関係式

図1より,

$$Y(s) = \frac{1}{s} [U(s) - X(s)]$$

$$X(s) = \frac{50}{s} \left[ Y(s) - \frac{1}{2s} X(s) \right]$$

が成り立つ。式を変形して,  $X(s)$  について解くと,

$$X(s) = \frac{50s}{s^2 + 25} Y(s)$$

式を式へ代入し,  $X(s)$  を消去することにより,  $U(s)$  から  $Y(s)$  までの伝達関数  $G(s)$  を求めると,

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{s^2 + 25}{s(s^2 + 75)}$$

が得られる。

これより, (a)は  $\frac{1}{s}$ , (b)は  $\frac{50}{s}$ , (c)は  $\frac{1}{2s}$ , (d)は  $\frac{s^2 + 25}{s(s^2 + 75)}$  となる。

(2) 共振角周波数

式の伝達関数の分母を零にする極より,  $s = \pm j\sqrt{75} = \pm j5\sqrt{3}$  が求まるので, 共振角周波数は,  $5\sqrt{3}$  [rad/s] となる。

(3) 伝達関数

図 2 より,  $U(s)$ ,  $X(s)$ ,  $Y(s)$ ,  $R(s)$  が満たす関係式は,

$$U(s) = -f_1 Y(s) - f_2 X(s) - \frac{f_3}{2s} X(s) + R(s)$$

となる。式より, (e) は  $-f_1 Y(s) - f_2 X(s) - \frac{f_3}{2s} X(s) + R(s)$  となる。

問題文の中で既に分母多項式が計算により与えられているので, フィードバック制御により制御対象の分子多項式を変化させることができないことを利用して, 式の結果から, (f) は  $s^2 + 25$  が得られる。

(4) 安定となるための  $f_3$  が満たす条件

$f_1 = 9$ ,  $f_2 = -0.5$  のとき, 式の特性多項式は

$$s^3 + 9s^2 + 50s + 25(f_3 + 9)$$

となる。この特性多項式に対して, ラウスの安定判別法を適用する。

$$\begin{array}{r} s^3 \\ s^2 \\ s^1 \\ s^0 \end{array} \begin{array}{cc} 1 & 50 \\ 9 & 25(f_3 + 9) \\ \frac{450 - 25(f_3 + 9)}{9} & 0 \\ 25(f_3 + 9) & \end{array}$$

安定条件は, 分母多項式の係数がすべて同符号(正), ラウス列がすべて同符号(正)の二つを同時に満たすことで与えられる。この条件より,

$$f_3 + 9 > 0, 450 - 25(f_3 + 9) > 0$$

が得られるので, これを整理すると,

$$-9 < f_3 < 9$$

となる。