

電験徒然草 63段

7-ピン発電機の運動方程式 ～問題文中の式は何を意味するのか～

(1/11)

まずは平成21年第1種 機械・制御問2を見てみる。

【平成21年1種 機械・制御問2】

7-ピン発電機の回転軸系を一つの質点にて近似した場合、その運動方程式は次式で表される。

$$J \frac{d^2 \theta_m}{dt^2} = T_a [N \cdot m] \quad \dots \textcircled{1}$$

ここで、 $J = GD^2/4 [kg \cdot m^2]$ は慣性モーメント (ただし、 $GD^2 [kg \cdot m^2]$ ははりみ車効果)、 $\theta_m [rad]$ は回転子の位置を表わす機械角、 $T_a [N \cdot m]$ は加速トルク、 $t [s]$ は時間である。
このとき、7-ピン発電機の回転体として蓄積エネルギー $E_k [J]$ は、

$$E_k = \frac{1}{2} J \left[\frac{d\theta_m}{dt} \right]^2 = \frac{1}{2} J \omega_m^2 [J] \quad \dots \textcircled{2}$$

として表される。ここで $\omega_m [rad/s]$ は回転子の機械角速度である。

また、①式の運動方程式は、発電機容量ベースの単位法表現では、7-ピン発電機の単位慣性定数 $H [s]$ と用いて次のように記述される。

$$2H \frac{d\omega_e}{dt} = \overline{T}_a [p.u.] \quad \dots \textcircled{3}$$

ここで、 $\omega_e [p.u.]$ は回転子の電気角速度、 $\overline{T}_a [p.u.]$ は加速トルクである。

同一発電所に並列運転された2台の7-ピン発電機(4極機) A, B がある。

両機の定格周波数を $50 [Hz]$ 、A の発電機容量を $1000 [MV \cdot A]$ 、そのはりみ車効果を $973 [t \cdot m^2]$ とし、一方 B の発電機容量を $800 [MV \cdot A]$ 、そのはりみ車効果を $830 [t \cdot m^2]$ とする。この7-ピン発電機の蓄積(運動)エネルギーに関して、次の問に答えよ。

(注) 単位慣性定数 H は、蓄積エネルギー定数とも呼ばれる。

(1) この A, B の7-ピン発電機が定格角速度で運転しているとき、これらの蓄積エネルギー $E_k [MJ]$ をそれぞれ求めよ。

(2) 単位慣性定数 $H [s]$ は蓄積エネルギー $E_k [MJ]$ と発電機容量 $[MV \cdot A]$ の分母は、蓄積エネルギーの発電機容量に対する比として計算できる。

この A, B の7-ピン発電機の単位慣性定数 $H [s]$ をそれぞれ求めよ。

(3) 並列運転された2台の7-ピン発電機 A, B が常に同じ角速度をもつと仮定して、容量 $1800 [MV \cdot A]$ の1台の等価発電機として機械的運動特性を表現するとき、その $1800 [MV \cdot A]$ ベースでの等価慣性定数 $H_{eq} [s]$ を求めよ。

【解答】

(1) 極数を p 、周波数を $f [Hz]$ とすれば、定格速度 N_s は

$$N_s = \frac{60f}{p/2} = \frac{60 \times 50}{4/2} = 1500 [min^{-1}]$$

よって 定格角速度 ω_s は

$$\omega_s = 2\pi \frac{N_s}{60} = 2\pi \frac{1500}{60} = 50\pi [rad/s]$$

タービン発電機の運動方程式 ~ 問題文中の式は何を意味しているか ~

(2/11)

②式を使って 定格角速度で運転しているときの, A, B のタービン発電機がもつ蓄積エネルギー E_{KA}, E_{KB} は,

$$E_{KA} = \frac{1}{2} J_A \omega_s^2 = \frac{1}{2} \frac{GD^2}{4} \omega_s^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{973 \times 10^3}{4} \cdot (50\pi)^2 = 3.0010 \times 10^9 \text{ [J]} \quad \left[\begin{array}{l} \pi = 3.1416 \\ \text{で計算している} \end{array} \right]$$

$$\div 3000 \text{ [MJ]} \quad \dots (\text{答})$$

$$E_{KB} = \frac{1}{2} J_B \omega_s^2 = \frac{1}{2} \frac{GD^2}{4} \omega_s^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{830 \times 10^3}{4} \cdot (50\pi)^2 = 2.5599 \times 10^9 \text{ [J]}$$

$$\div 2560 \text{ [MJ]} \quad \dots (\text{答})$$

(2) 題意より A, B のタービン発電機の単位慣性定数 H_A, H_B は,

$$H_A = \frac{E_{KA}}{P_{nA}} = \frac{3.0010 \times 10^9}{1000 \times 10^6} = 3.001 \div 3.00 \text{ [s]} \quad \dots (\text{答})$$

$$H_B = \frac{E_{KB}}{P_{nB}} = \frac{2.5599 \times 10^9}{800 \times 10^6} = 3.1999 \div 3.20 \text{ [s]} \quad \dots (\text{答})$$

(3) 設問(2)で求めた H_A, H_B は それぞれの定格容量ベースの値であるから, 1800 [MVA] ベースに換算する。

$$H_A' = H_A \frac{1000}{1800} = 3.001 \times \frac{1000}{1800} = 1.6672 \text{ [s]}$$

$$H_B' = H_B \frac{800}{1800} = 3.1999 \times \frac{800}{1800} = 1.4222 \text{ [s]}$$

従って 容量 1800 [MVA] の1台の等価発電機としての単位慣性定数 H_{eg} は

$$H_{eg} = H_A' + H_B' = 1.6672 + 1.4222 = 3.0894 \div 3.09 \text{ [s]} \quad \dots (\text{答})$$

(別解)

A, B 2台の蓄積エネルギーの合計を等価発電機の容量 P_{neg} で割って, 求める等価慣性定数 H_{eg} は

$$H_{eg} = \frac{E_{KA} + E_{KB}}{P_{neg}} = \frac{(3.0010 + 2.5599) \times 10^9}{1800 \times 10^6} = 3.0894 \div 3.09 \text{ [s]} \quad \dots (\text{答})$$

以上で解答は終了。

設問を解くのに, 問題文中の①式は使用しなかった。有名なニュートンの運動方程式から求めることとする。

ニュートンの運動方程式は

$$F = ma = m \frac{d^2 x}{dt^2} \quad \left[\begin{array}{l} \text{ここで, } F \text{ [N]} \text{ は力, } m \text{ [kg]} \text{ は質量, } a \text{ [m/s}^2\text{]} \text{ は加速度} \\ x \text{ [m]} \text{ は移動距離, } t \text{ [s]} \text{ は時間。} \end{array} \right]$$

円運動をしているものとして, 半径 r [m] と掛けたトルクを作る。

$$F \cdot r = m \cdot r \frac{d^2 x}{dt^2} \quad \dots \textcircled{a}$$

タービン発電機の運動方程式 ~問題文中の式は何を意味するの~

(3/11)

回転子の位置を表わす機械角 θ_m と円周上の移動距離 x [m] の関係は

$$x = r \theta_m$$

であるから (a) 式は

$$F \cdot r = m \cdot r \frac{d^2(r \theta_m)}{dt^2}$$

r は定数だから微分の外に出して

$$F \cdot r = m r^2 \frac{d^2 \theta_m}{dt^2}$$

トルク $T_a = F \cdot r$ であり $m r^2 = J$ (慣性モーメントと呼ぶ) とおくと

$$J \frac{d^2 \theta_m}{dt^2} = T_a$$

となる。

【慣性モーメント J 】

慣性モーメント J [$\text{kg} \cdot \text{m}^2$] は半径 r [m] で回転している質量 m [kg] の質点が持つモーメントである。

m が複数あると合計の慣性モーメントは

$$J = \sum_i m_i r_i^2$$

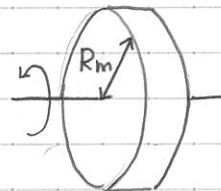
m_i がひとかたまりのものであれば合計質量は

$$M = \sum_i m_i$$

となるが、半径は代表するある等価的な半径となる。

$$J = \sum_i m_i r_i^2 = M \cdot R^2 \dots \textcircled{b}$$

を満たす R であるが、右のような半径 R_m の円盤とみると、上式 $\textcircled{b}$ の R は R_m とは一致しない。



右の円盤の面密度を ρ [kg/m^2] とすると幅 dr の微小円筒の質量は

$$dm = \rho \cdot 2\pi r dr$$

であるから、この微小円筒の慣性モーメントは

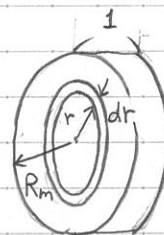
$$dJ = dm \cdot r^2 = 2\pi \rho r^3 dr$$

円筒全体の慣性モーメントは

$$J = \int_0^{R_m} dJ = \int_0^{R_m} 2\pi \rho r^3 dr = 2\pi \rho \left[\frac{r^4}{4} \right]_0^{R_m} = \frac{1}{2} \pi \rho R_m^4$$

これを円筒全体の重量は

$$M = \rho \times \pi R_m^2 \dots \textcircled{c}$$



フービン発電機の運動方程式 ~ 問題文中の式は何を意味するの? ~

(4/11)

よって

$$J = \frac{1}{2} \pi \rho R_m^4 = \rho \pi R_m^2 \left(\frac{R_m}{\sqrt{2}} \right)^2$$

と変形して、③式と

$$\frac{R_m}{\sqrt{2}} \rightarrow R$$

を代入することにより、

$$J = MR^2$$

となる。 $R = R_m / \sqrt{2}$ の等価半径となる。

【はみ車効果】

 GD^2 をはみ車効果という。

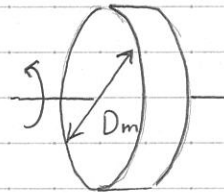
慣性モーメントが

$$J = MR^2$$

であり、 $D = 2R$ (直径 = $2 \times$ 半径) により

$$J = \frac{GD^2}{4}$$

となるが、ここで直径も等価的な値であり

例えば右図の円筒の D_m とは一致しない。

半径よりも直径の方が大きさをイメージしやすいので、はみ車効果の数値と提示してあるが、 GD^2 (ジ-デー-スクエア) はひとつの記号として見た方がいい。 G はひかたまりの全重量を表わすが、 D は等価的な直径である。円筒の半径とそのまま代入するものではない。

【蓄積エネルギー】

回転体の持つ蓄積エネルギー E_k は質点の運動エネルギーの集まりである。質量 m [kg] の質点が速度 v [m/s] で運動しているとき、その運動エネルギー E_m は、

$$E_m = \frac{1}{2} m v^2 \text{ [J]}$$

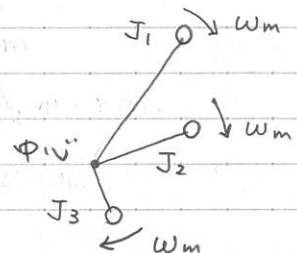
である。

半径 r で回転しているならば $v = r \omega_m$ (ω_m = 機械的角速度 [rad/s]) であるから、

$$E_m = \frac{1}{2} m (r \omega_m)^2$$

$$= \frac{1}{2} m r^2 \omega_m^2$$

$$= \frac{1}{2} J \omega_m^2 \quad (\because J = m r^2)$$



同じ点を中心として回転している複数の質点の合計の蓄積エネルギーは
[同じ角速度で]

タービン発電機の運動方程式

～問題文中の式は何を意味するか～

(5/11)

$$E_k = \sum_i \frac{1}{2} J_i \omega_m^2$$

$$= \frac{1}{2} \left(\sum_i J_i \right) \cdot \omega_m^2$$

ω_m は $J_i = m_i r_i^2$ と無関係に一定の値なので $\sum$ の外に出せる

$$\therefore E_k = \frac{1}{2} J \omega_m^2 \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{この } J \text{ は まとめた } \omega_m \text{ の} \\ \text{合計 慣性モーメント} \end{array} \right.$$

【単位慣性定数 H】

単位慣性定数 H は、蓄積エネルギー定数とも呼ばれ、定格速度時の蓄積エネルギー E_k [J] の発電機容量 P_n [VA] に対する比と問題に記載されている。よって

$$H = \frac{E_k}{P_n} = \left(\frac{1}{2} J \omega_n^2 \right) \times \frac{1}{P_n}$$

定格(角)速度で回転する回転体の持つ蓄積エネルギーが発電機容量の何秒分かという値と言える。

これを変形して

$$J = \frac{2 H P_n}{\omega_n^2} \quad \dots (d)$$

$$\left\{ \frac{[J]}{[W]} = \frac{[J]}{[J/s]} = [s] \right.$$

【単位法で表わした運動方程式】

①式を H21年問題中の①式に代入すると

$$\frac{2 H P_n}{\omega_n^2} \frac{d^2 \theta_m}{dt^2} = T_a \quad \dots (e)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{次元は同じ} \\ P = V \cdot I \cdot \cos \theta \\ [W] = [V] \cdot [A] \cdot [\text{無次元}] \rightarrow [V \cdot A] \end{array} \right.$$

P_n の単位は [VA] であるから [W] と同等。 $P_n = \omega_n T_n$ (n は定格であることと表わす)。

また、 $d\theta_m/dt = \omega_m$ だからこれを①式に代入して、

$$\frac{2 H \cdot \omega_n T_n}{\omega_n^2} \frac{d\omega_m}{dt} = T_a$$

$$\therefore 2 H \frac{d(\omega_m/\omega_n)}{dt} = \frac{T_a}{T_n}$$

$$\therefore 2 H \frac{d\overline{\omega_m}}{dt} = \overline{T_a} \quad [\text{p.u.}]$$

単位法で表せば、 $\overline{\omega_m} = \overline{\omega_e}$ だから

H21年問題中の③式

$$2 H \frac{d\overline{\omega_e}}{dt} = \overline{T_a} \quad [\text{p.u.}]$$

が得られる。

機械角速度 ω_m と電気角速度 ω_e の関係は、極数と P [極] とは

$$\omega_m = \frac{\omega_e}{P/2} = \frac{2\omega_e}{P}$$

であるので、定格機械角速度と ω_n 、定格電気角速度と ω_{en} とすると、

$$\overline{\omega_m} = \frac{\omega_m}{\omega_n} = \left(\frac{2\omega_e}{P} \right) \cdot \frac{1}{\left(\frac{2\omega_{en}}{P} \right)} = \frac{\omega_e}{\omega_{en}} = \overline{\omega_e}$$

問題文中に T_a [N.m] は加速トルクであると記載されている。タービンから入力する機械トルクを T_m 、電気的出力トルクを T_e とすると、

$$T_a = T_m - T_e \quad [T_m > T_e \text{ のとき、加速する}]$$

入力と出力が一致しており $T_m = T_e$ であれば $T_a = 0$ となり

$$\frac{d\overline{\omega_e}}{dt} = 0$$

積分して $\omega_e = \text{constant}$ となる。→ 一定速度で回転する。

タービン発電機の運動方程式' ~問題文中の式は何を意味するの~ (6/11)

次に H29年1種の問題に移る。

【H29年1種 電力管理問4】

図において、並行2回線送電線(周波数50Hz)の1回線故障に伴う高速再閉路がタービン発電機の軸に与える影響を検討する。昇圧変圧器の高压側母線至近端で三相短絡故障(故障点抵抗零)が発生し、その後0.1秒で三相遮断、故障除去、1回線運用に瞬時に移行した状況と想定する。次の問に答えよ。

タービン発電機は過渡リアクタンス背後電圧一定のモデルで表現し、その定格容量は1000 MV・A、過渡リアクタンスは $x_d' = 0.3$ p.u. (自己容量基準)、慣性定数 M は自己容量基準で7秒とし、固定子抵抗、励磁制御や調速機の効果、電氣的トルクの振動成分は全て無視するものとする。ここで、発電機の回転速度 ω の挙動は、機械的入力 P_m 、電氣的出力 P_e を用いて微分方程式

$$M \frac{d\omega}{dt} = P_m - P_e$$

で表現するものとする。なお、回転速度の変化は小さいため、電力とトルクは同じものと仮定する。変圧器と送電線はともにリアクタンス0.1 p.u. (1000 MV・A基準。送電線は1回線分)とし、その他のインピーダンスは無視する。故障発生前は、タービン発電機は定格端子電圧1.0 p.u.、定格出力、定格力率90% (遅れ)で運転していたものとする。

- (1) 短絡時の電氣的トルクのステップ変化の大きさを p.u. 単位で求めよ。
- (2) 故障発生後0.1秒間のタービン発電機の内部相差角増大量 $\Delta\delta$ を rad 単位で計算せよ。
- (3) 故障発生前及び故障除去後(1回線運用中)の直列合成リアクタンス(発電機内部電圧から無限大母線までの間にある全リアクタンスを合成した値)とそれぞれ求めよ。また、故障発生前の発電機の運転条件から、 x_d' 背後電圧 E_g' の大きさと、無限大母線電圧 V_i の大きさを求めよ。答えは全て p.u. 単位で記すこと。
- (4) 小問(2)で求めた故障除去時までの $\Delta\delta$ [rad] について $\sin \Delta\delta \div \Delta\delta$ と近似するものとして、故障除去時の電氣的トルクのステップ変化の大きさを p.u. 単位で求めよ。正弦関数の加法定理 $\sin(\alpha + \beta) = \sin \alpha \cos \beta + \cos \alpha \sin \beta$ を用いてよい。
- (5) 高速再閉路の際に故障が

継続していると再び電氣的トルクが大きく変化する。タービン発電機には振動数10 Hz程度の軸ねじれ振動を生じることと参考にして、高速再閉路のタイミングが0.1秒程度以下であれば軸の機械的疲労が大きく左右されることと説明せよ。

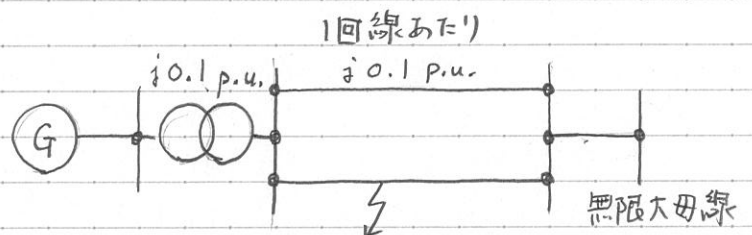


図 一機無限大母線系統

タービン発電機の運動方程式 ~問題中の式は何を意味するか~

(7/11)

【解答】

(1) 抵抗分は全て無視してあるので、短絡時の発電機出力は零である。

短絡前は、定格出力であり、定格力率 90% (遅れ) で運転しているため出力は

$$1 \times 0.9 = 0.9 [\text{p.u.}]$$

である。従って短絡時の電氣的トルクがステップ変化の大きさは、

$$0.9 - 0.0 = 0.9 [\text{p.u.}] \quad \dots (\text{答})$$

(2) 調速機の効果は無視するため、機械的入力 P_m は故障中も故障前の入力と同じであり、それは故障前の電氣的出力 $0.9 [\text{p.u.}]$ に等しい。

よって、故障中の運動方程式は

$$M \frac{d\omega}{dt} = P_m - P_e = 0.9 - 0.0 = 0.9$$

$$M = 7 [\text{s}] \text{ であるから}$$

$$\therefore \frac{d\omega}{dt} = 0.9$$

$$\therefore \frac{d\omega}{dt} = \frac{0.9}{7} = 0.12857 [\text{p.u./s}]$$

故障除去までの 0.1 秒間、上記の一定な角加速度で内部相差角は増大していくので、求める増大量 $\Delta \delta$ は

$$\Delta \delta = \frac{1}{2} \times 0.12857 \times (0.1)^2 \times 2\pi \times 50$$

$$= 0.20195$$

$$\doteq 0.202 [\text{rad}] \quad \dots (\text{答})$$

[$\pi = 3.1416$ で計算]

$$\left[\begin{array}{l} \frac{1}{2} \times 0.12857 \times (0.1)^2 = \text{物体の } a [\text{m/s}^2] \\ \text{一定で運動している時 } t [\text{s}] \text{ 後の移動距離} \\ \text{が } \frac{1}{2} at^2 [\text{m}] \text{ とする } a \text{ と同じ考える。} \end{array} \right]$$

$$\left[\begin{array}{l} \frac{1}{2} \times 0.12857 \times (0.1)^2 \text{ という } [\text{p.u.}] \text{ 値に} \\ 2\pi f \text{ を掛けて } [\text{rad}] \text{ 値としている。} \\ \text{何故角速度 } \omega? \text{ 内部相差角 } \delta \text{ に?} \\ \rightarrow f \text{ は 1 秒間に何回転したいか。だから、} \\ 2\pi f \text{ は 1 秒間に何 } [\text{rad}] \text{ 移動したいか} \\ \text{を表わすことになる。 } 0.1 [\text{s}] \text{ で動いた} \\ \text{た } [\text{p.u.}] \text{ 値に掛けることになり、 } 0.1 [\text{s}] \\ \text{で動いた } [\text{rad}] \text{ 値になる。} \end{array} \right]$$

(3) 故障発生前の直列合成リアクタンスは、2回線運用中だから

$$0.3 + 0.1 + \frac{0.1}{2} = 0.45 [\text{p.u.}] \quad \dots (\text{答})$$

また、故障除去後 (1回線運用中) の直列合成リアクタンスは

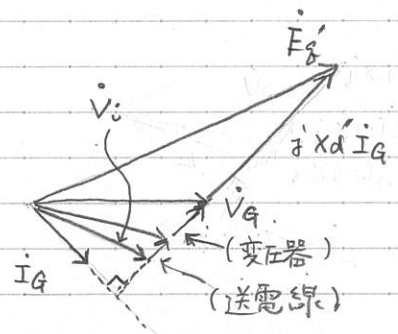
$$0.3 + 0.1 + 0.1 = 0.5 [\text{p.u.}] \quad \dots (\text{答})$$

次に、故障発生前のベクトル図は定格電圧、電流とそれぞれ V_G , I_G とすると右図のように書けるので x_d' 背後電圧 E_g' は

$$\begin{aligned} E_g' &= V_G + j x_d' \cdot I_G \\ &= 1.0 + j 0.3 \times (0.9 - j \sqrt{1 - (0.9)^2}) \\ &= 1.0 + j 0.3 \times (0.9 - j 0.43589) \\ &= 1.1308 + j 0.27 [\text{p.u.}] \end{aligned}$$

よって大きさ E_g' は

$$\begin{aligned} E_g' &= \sqrt{(1.1308)^2 + (0.27)^2} \\ &= 1.1626 \\ &\doteq 1.16 [\text{p.u.}] \quad \dots (\text{答}) \end{aligned}$$



7-ヒン発電機の運動方程式 ~ 問題中の式は何を意味するの? ~

(8/11)

無限大母線電圧 V_i も同様にベクトル図から V_i と基準とす

$$\dot{V}_i = 1 - j(0.1 + \frac{0.1}{2}) \times (0.9 - j0.43589)$$

$$= 0.93462 - j0.135$$

よって $\dot{V}_i$ の大きさは V_i は

$$V_i = \sqrt{(0.93462)^2 + (0.135)^2}$$

$$= 0.94432$$

$$\approx 0.944 \text{ [p.u.]} \dots (\text{答})$$

(4) 故障発生前の内部相角度 δ とす。 $E_g' \sim V_i$ 間のリアクタンス

は小問(3)より 0.45 であり、故障発生前の発電機出力は、

$$P = 0.9 = \frac{E_g' V_i}{0.45} \sin \delta$$

よって

$$\sin \delta = \frac{0.9 \times 0.45}{1.1626 \times 0.94432} = 0.36890$$

故障除去後は、内部相角度が $\delta + \Delta \delta$ となり、合成直列リアクタンス

は小問(3)より 0.5 であり、故障除去後の発電機出力は、

$$P = \frac{E_g' V_i}{0.5} \sin(\delta + \Delta \delta)$$

ここで

$$\sin(\delta + \Delta \delta) = \sin \delta \cos \Delta \delta + \cos \delta \sin \Delta \delta \text{ は、}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \sin \delta = 0.36890 \text{ より } \cos \delta = \sqrt{1 - \sin^2 \delta} = 0.92947 \\ \sin \Delta \delta \approx \Delta \delta = 0.202 \text{ より } \cos \Delta \delta = \sqrt{1 - \sin^2 \Delta \delta} = 0.97939 \end{array} \right.$$

であるから

$$\sin(\delta + \Delta \delta) = 0.36890 \times 0.97939 + 0.92947 \times 0.202 = 0.54905$$

よって 事故除去後の発電機出力は、

$$P = \frac{1.1626 \times 0.94432}{0.5} \times 0.54905$$

$$= 1.2056$$

$$\approx 1.21 \text{ [p.u.]} \dots (\text{答})$$

(5) < 試験センター標準解答 >

再閉路時に故障点の短絡が解消されない場合、再び三相短絡が発生し、(1)で求めたような大きな電氣的トルクが再び軸に加わることになる。このため軸は故障発生時に加速方向、故障除去時に減速方向、再閉路(失敗)時に再び加速方向の電氣的トルクの急激な変化にさらされる。この大きな衝撃によって軸にはねじれ振動が発生するが、その減衰は一般に極めて悪く、固有振動数は 10 Hz 程度である。このため、再閉路失敗のタイミングが 0.1 秒程度以下の範囲でなければ前後するだけで、その瞬間の軸の

タービン発電機の運動方程式 ～問題中の式は何を意味するの～

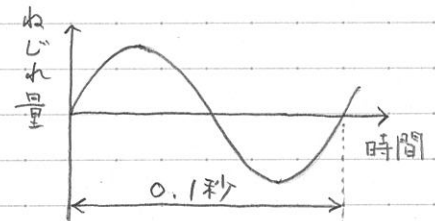
(9/11)

ねじり振動は様々な状態をとりうる。最悪の場合としては軸がずっと加速しているという
で、再閉路失敗の加速方向のステップ変化を受け入れることも考えられ、この場合には軸は
大きく機械的にひびくことになり、材料疲労は過酷となる。

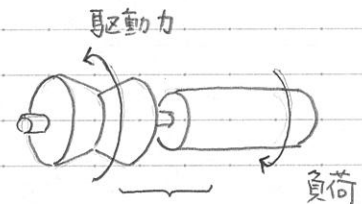
解答終了。

【小問(5)について】

ねじり振動の振動数が 10 Hz ということは、1周期が
 0.1 秒 ということであり(右図参照)、この間にねじり振動
の全ての状態が存在しうることと示す。従って再閉路失
敗のタイミングがわからないにしろ、ねじり振動はさ
まざまな状態を取り得る。



タービンで駆動し発電機を回転させている訳だから、
一定出力で運転中はいくばくかのねじりを保持して回
転している。(右図)

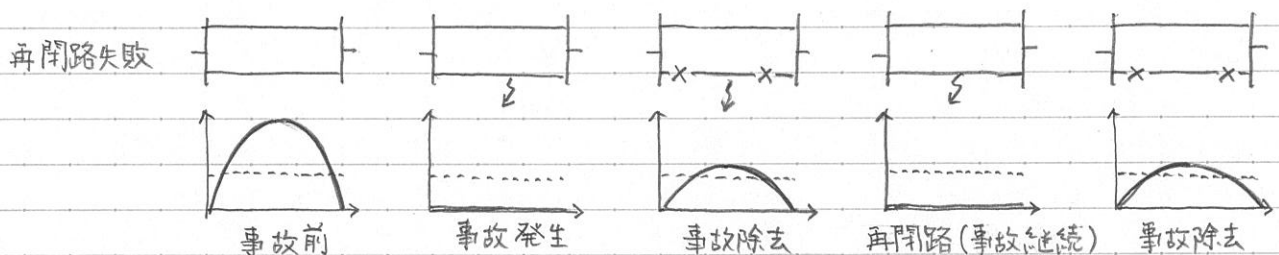
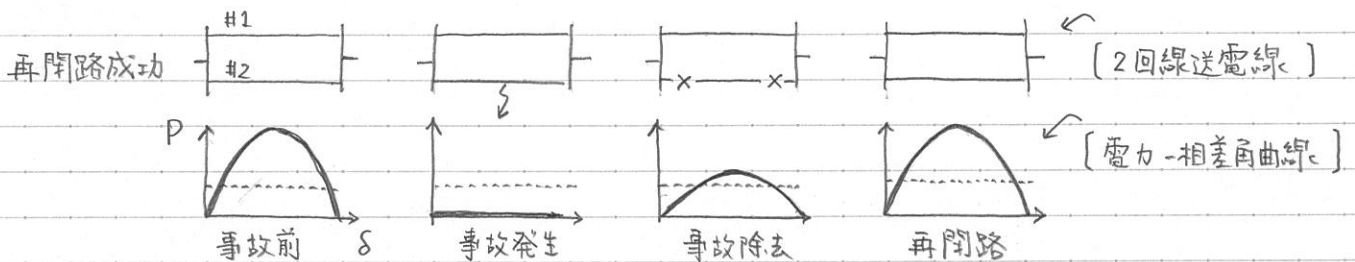


そこで送電線事故が起ると電気出力(負荷)がなくな
るのでタービン～発電機間のねじりは小さくなる
とする。それは自由(ねじり)振動になるから小さくなる。

軸の回転
そのものは
加速する。

「ねじりを保持して
一定速度で回転」

その後事故除去(1回線となる)で電氣的負荷が復活し、さらに再閉路で事故前の電気出力
曲線(2回線運用)に戻る。この再閉路時に事故が継続していると再び負荷0となり、
事故除去で電氣的負荷を負う(1回線運用)。これらのステップ変化がタイミングによってはねじれ
と助長し、材料強度的に厳しい場合がある。



タービン発電機の運動方程式

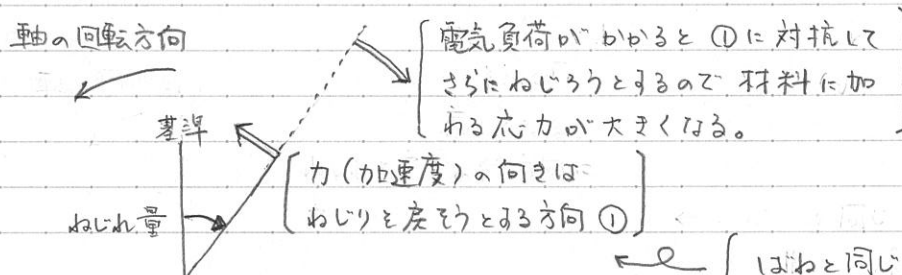
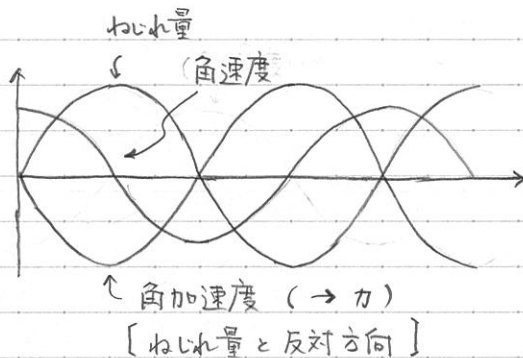
～問題中の式は何を意味するの～

(10/11)

電氣的負荷が復活すると、それは軸の回転方向とは、逆向きの力となるのだから、ねじれ量が反回転方向に最大の時に負荷が復活する時の最も厳しい。← さらにねじろうとする。

標準解答中の「軸がちょうど加速している時」というのは、軸の回転が加速している時ではなく、軸のねじれ振動に対する角速度が加速している時だと思う。

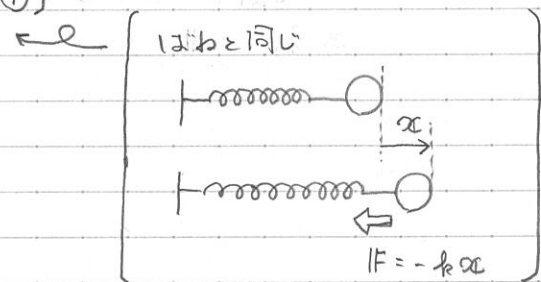
ねじれ量(ねじれ角)を微分すると、ねじれ振動の角速度、それをさらに微分するとねじり角加速度となるが、これは正弦波であるので、ねじれ量とねじり角加速度は 180° 位相が異なる。



順序が逆となったが、

【小問(4)の更なる問い】

この後の δ の動きについて説明せよ。



【解答】

事故除去後の電気出力 P は 1.21 [p.u.] となるが、この時機械出力は 0.9 [p.u.] を継続しているため、入力 > 出力となり減速を始める。慣性により徐々に減速する間に、相差点はさらに増加し、やがて速度が系統周波数まで減速すると相差点は減少に転じる。この後入力 = 出力となる相差点へ向かうが、慣性があるため振動しながら収束する。(解答終了)

この様子を図示すると次のページのようになる。

7-ヒン発電機の運動方程式 ~ 問題中の式は何と意味があるか ~

(11/11)

小問(4)より $\sin \delta = 0.36890$

$\therefore \delta = 0.37783 [\text{rad}] \rightarrow 0.378 [\text{rad}]$
[関数電卓使用]

$\therefore \delta = \frac{0.37783}{2\pi} \times 360^\circ = 21.7 [^\circ]$

小問(1)より

$\Delta \delta = 0.20195 [\text{rad}] \rightarrow 0.202 [\text{rad}]$

$\therefore \Delta \delta = \frac{0.20195}{2\pi} \times 360^\circ = 11.6 [^\circ]$

2.1より

$\delta + \Delta \delta = 0.58 [\text{rad}]$
 $= 33.2 [^\circ]$

また収束時の相差点を δ' とすると

$0.9 = \frac{E_{\delta'} \cdot V_i}{0.5} \sin \delta'$

$\sin \delta' = \frac{0.9 \times 0.5}{1.1626 \times 0.94432}$
 $= 0.40989$

$\therefore \delta' = 0.42233 [\text{rad}] \rightarrow 0.422 [\text{rad}]$

$\therefore \delta' = \frac{0.42233}{2\pi} \times 360^\circ = 24.2 [^\circ]$

