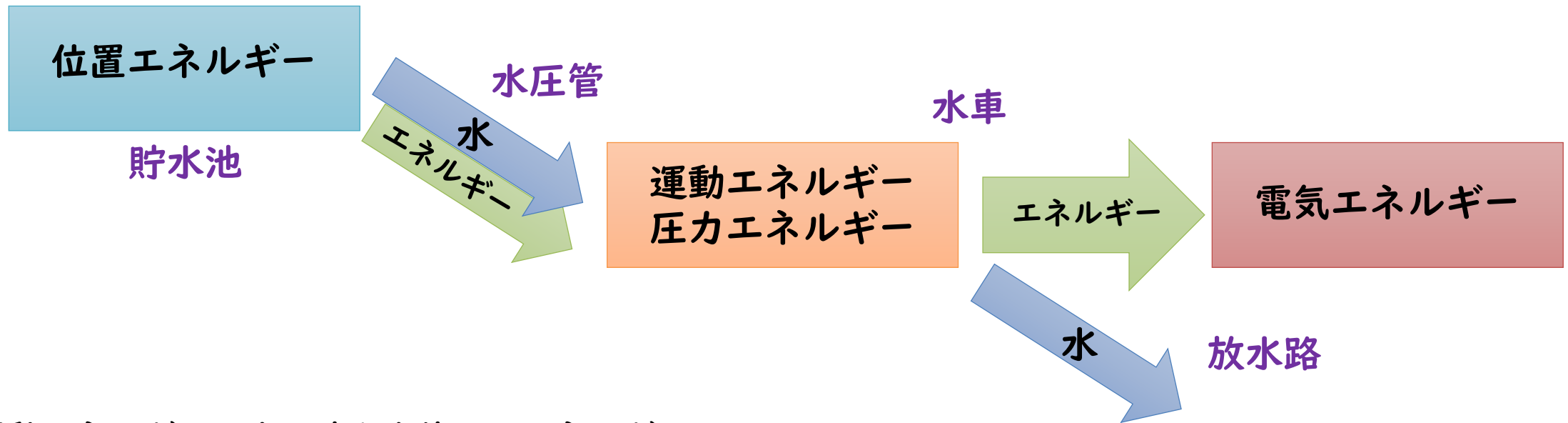


電験三種 オンライン講座

電力 過去問解説(Ⅰ) 水力発電

水力発電

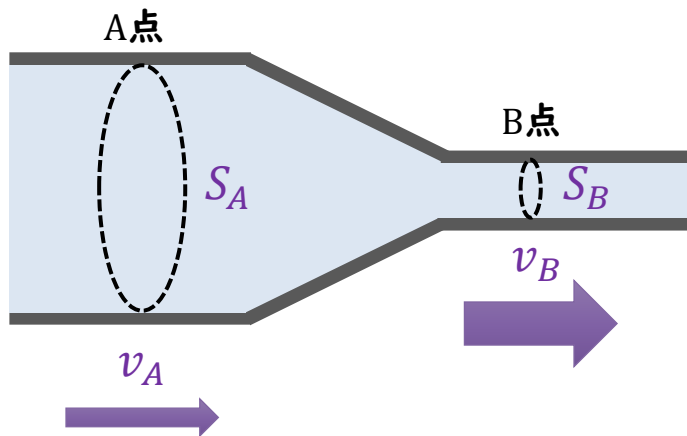
水が高いところから低いところへ落ちるときに発生するエネルギーを利用して、水車（発電機）を回転させて電力を得る



運動エネルギー：水の速さを使ったエネルギー

圧力エネルギー：水の重さ（押し付ける力）を使ったエネルギー

水力学 (連続の定理と圧力エネルギー)

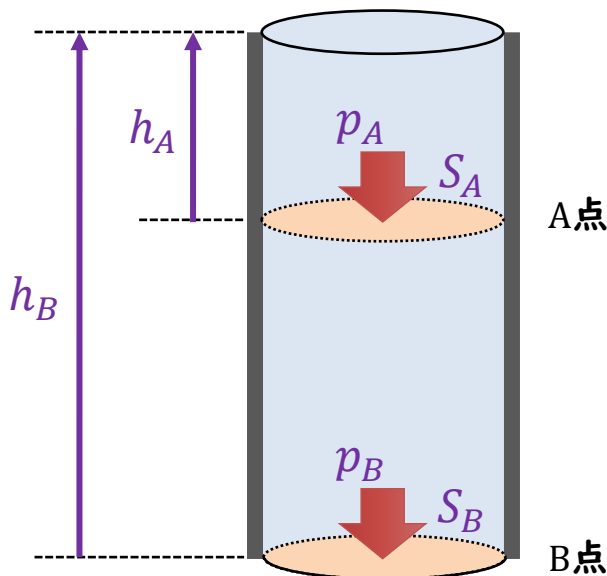


ホースの先をつまむと水の勢いが強くなる
 →水の通路の断面積が小さくなると流速が上昇する
 →断面積中を瞬間的に通過する水の量は変わらない
 ⇒流量 Q [m^3/s] は変化しない (連続の定理)

$$Q_A = S_A v_A$$

$$Q_B = S_B v_B$$

$$Q_A = Q_B \rightarrow S_A v_A = S_B v_B$$



A点の位置エネルギー

$$U_A = F_A \cdot h_A = p_A S_A h_A = p_A V_A = p_A \frac{m_A}{\rho}$$

$$m_A = \rho V_A$$

ρ : 密度 [kg/m^3]

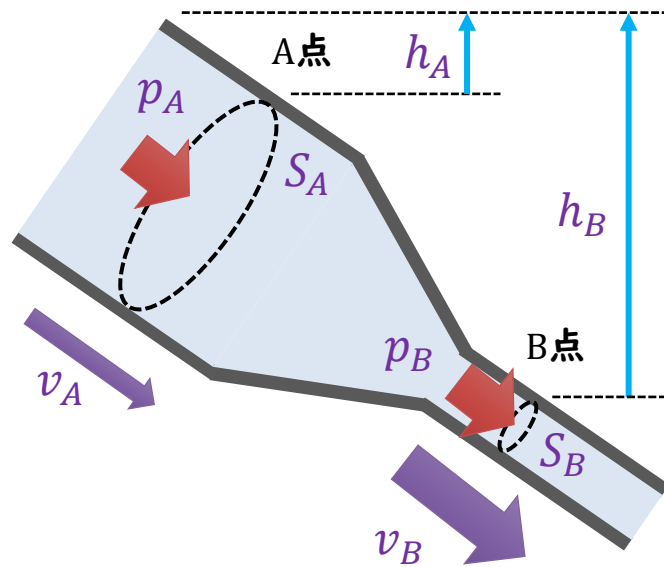
圧力×体積がエネルギーを表す

B点の位置エネルギー

$$U_B = F_B \cdot h_B = p_B S_B h_B = p_B V_B = p_B \frac{m_B}{\rho}$$

$$\text{圧力エネルギー} = p \frac{m}{\rho}$$

水力学（ベルヌーイの定理）



A点のエネルギー

=位置エネルギー+圧力エネルギー+運動エネルギー

$$E_A = m_A g h_A + p_A \frac{m_A}{\rho} + \frac{1}{2} m_A v_A^2$$

A点の単位体積当たりのエネルギー e_A を考えると、

$$e_A = \frac{E_A}{V_A} = \frac{m_A}{V_A} g h_A + p_A \frac{m_A}{\rho V_A} + \frac{1}{2} \frac{m_A}{V_A} v_A^2 = \rho g h_A + p_A + \frac{1}{2} \rho v_A^2$$

同様にB点の単位体積当たりエネルギー e_B は、

$$e_B = \frac{E_B}{V_B} = \frac{m_B}{V_B} g h_B + p_B \frac{m_B}{\rho V_B} + \frac{1}{2} \frac{m_B}{V_B} v_B^2 = \rho g h_B + p_B + \frac{1}{2} \rho v_B^2$$

エネルギー保存則より、それぞれの単位体積当たりのエネルギーは一致する

A点の単位体積当たりのエネルギー e_A を考えると、

$$\rho g h_A + p_A + \frac{1}{2} \rho v_A^2 = \rho g h_B + p_B + \frac{1}{2} \rho v_B^2$$

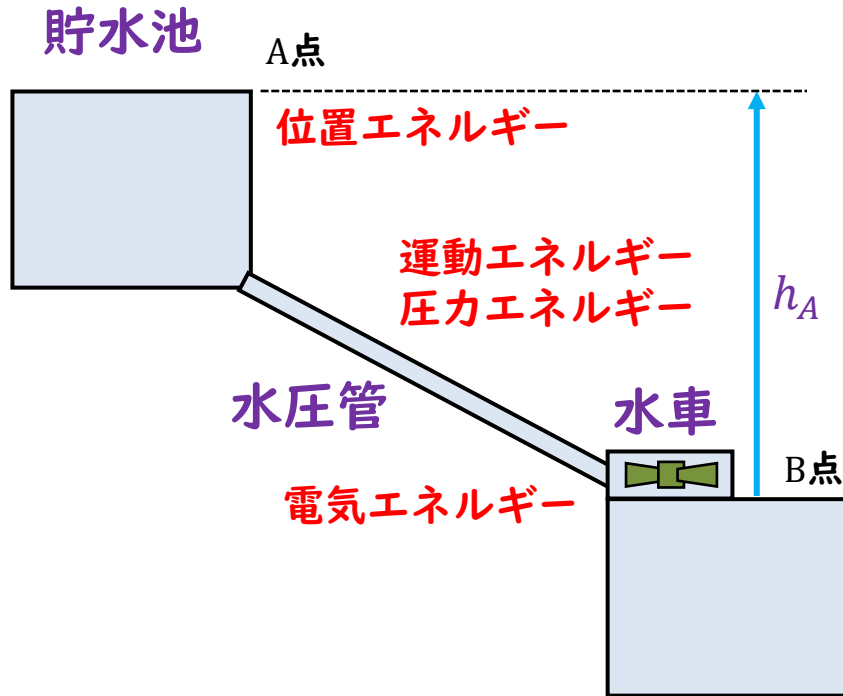
$$h_A + \frac{p_A}{\rho g} + \frac{v_A^2}{2g} = h_B + \frac{p_B}{\rho g} + \frac{v_B^2}{2g} = \text{一定 [m]}$$

ベルヌーイの定理

※単位が『m』であることに注意

各エネルギーを位置エネルギーの高さに換算したもので『水頭』という

水力学 (水頭と電力)



$$h_A + \frac{p_A}{\rho g} + \frac{v_A^2}{2g} = h_B + \frac{p_B}{\rho g} + \frac{v_B^2}{2g} = \text{一定 [m]}$$

ベルヌーイの定理

※単位が『m』であることに注意
各エネルギーを位置エネルギーの高さに換算したもので『水頭』という

A点からB点までの全てのエネルギーが電気エネルギーに変換されることを考えると

$$h_A + 0 + 0 = 0 + \frac{p_B}{\rho g} + \frac{v_B^2}{2g} \rightarrow h_A = \frac{p_B}{\rho g} + \frac{v_B^2}{2g}$$

B点の圧力エネルギーと運動エネルギーが全て電気エネルギーに変わる

位置エネルギー

$$U_A = F \cdot h_A = mg \cdot h_A = \rho V g \cdot h_A$$

電力はエネルギーの時間変化量なので

$$P = \frac{dU_A}{dt} = \frac{d}{dt} (\rho V g h_A) = \rho g h_A \frac{dV}{dt} = \rho g h_A Q$$

体積の時間変化量は流量 Q [m^3/s]
連続の定理より流量はどこでも同じ

理論水力

$$P_0 = 9.8 QH \text{ [kW]}$$

$$P \text{ [W]} = \underline{1000 \text{ [kg/m}^3\text{]}} \times 9.8 \text{ [N/kg]} \times Q h_A \rightarrow P \text{ [kW]} = 9.8 \times Q h_A$$

水は 1000 cm^3 で 1 kg
 1 m^3 で 1000 kg

H21 問1



水力発電所において、有効落差100m、水車効率92%、発電機効率94%、定格出力2500kWの水車発電機が80%負荷で運転している。このときの流量[m³/s]の値として、最も近いものは次のうちどれか。

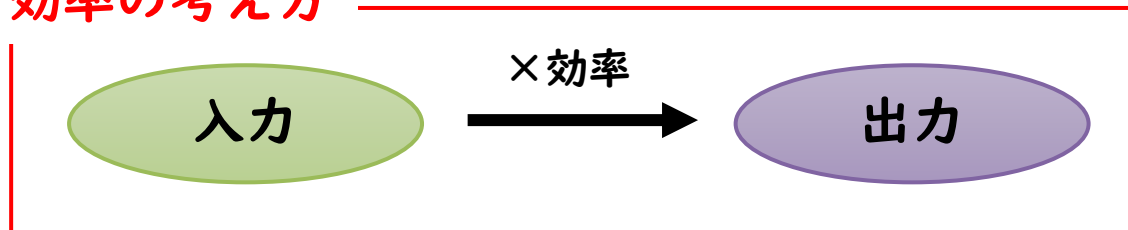
- (1) 1.76 (2) 2.36 (3) 3.69 (4) 17.3 (5) 23.1

H21 問1

水力発電所において、有効落差100m、水車効率92%、発電機効率94%、定格出力2500kWの水車発電機が80%負荷で運転している。このときの流量[m³/s]の値として、最も近いものは次のうちどれか。

- (1) 1.76 (2) 2.36 (3) 3.69 (4) 17.3 (5) 23.1

効率の考え方



$$\begin{aligned} P &= 9.8QH \times (\text{水車効率}) \times (\text{発電機効率}) \\ &= 9.8 \times Q \times 100 \times 0.92 \times 0.94 \\ &= 2500 \times 0.8 \end{aligned}$$

$$Q = \frac{2500 \times 0.8}{9.8 \times 100 \times 0.92 \times 0.94} = 2.36 \text{ m}^3/\text{s}$$

理論水力

$$P_0 = 9.8 QH \text{ [kW]}$$

H14 問1



最大使用水量 $15\text{m}^3/\text{s}$ 、総落差 110m 、損失落差 10m の水力発電所がある。年平均使用水量を最大使用水量の 60% とするとき、この発電所の年間発電電力量 $[\text{GW}\cdot\text{h}]$ の値として、最も近いのは次のうちどれか。ただし、発電所総合効率は 90% 一定とする。

- (1) 7.1 (2) 70 (3) 76 (4) 84 (5) 94

H14 問1

最大使用水量 $15\text{m}^3/\text{s}$ 、総落差 110m 、損失落差 10m の水力発電所がある。年平均使用水量を最大使用水量の 60% とするとき、この発電所の年間発電電力量 $[\text{GW}\cdot\text{h}]$ の値として、最も近いのは次のうちどれか。ただし、発電所総合効率は 90% 一定とする。

- (1) 7.1 (2) 70 (3) 76 (4) 84 (5) 94

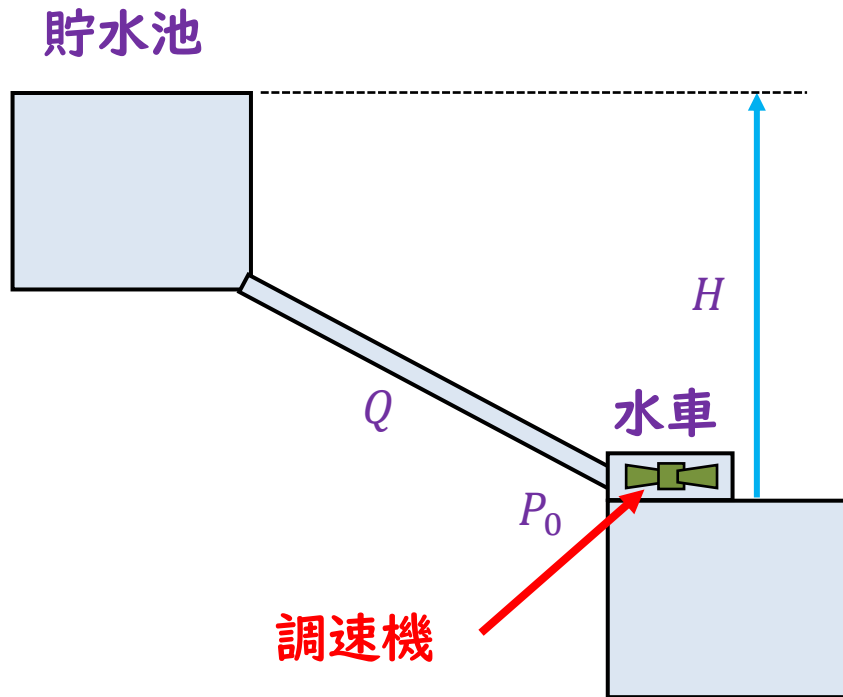
$$\begin{aligned} P &= 9.8QH \times (\text{発電機効率}) \\ &= 9.8 \times (0.6 \times 15) \times (110 - 10) \times 0.9 \\ &= 7938 \text{ kW} \end{aligned}$$

$$W = P \times 365 \times 24 = 7938 \times 365 \times 24 = 69,536,880 \text{ kW}\cdot\text{h} = 70 \text{ GW}\cdot\text{h}$$

调速機

水車の回転数が変わると→発電される電気の周波数が変化する
同期機の同期速度

$$N_s = \frac{120f}{p} [\text{min}^{-1}]$$

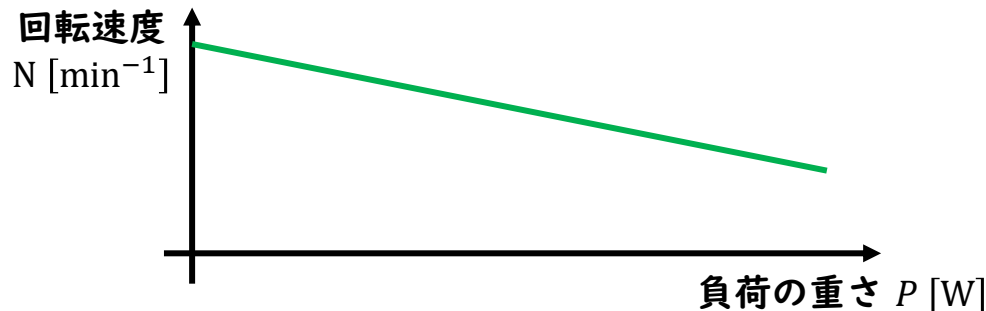


水車の回転数が変わる原因

- ・流量 Q が変化する
- ・水車の負荷が変化する（電力の負荷が変化する）
→負荷が重いと回転速度が下がる
→負荷が軽いと回転速度が上がる

水車の速度を調整する機構→调速機

- ・フランシス水車：ガイドベーンの開閉
- ・ペルトン水車：ニードル弁の開閉



H26 問1

問1 次の文章は、水車の調速機の機能と構造に関する記述である。

水車の調速機は、発電機を系統に並列するまでの間においては水車の回転速度を制御し、発電機が系統に並列した後は を調整し、また、事故時には回転速度の異常な を防止する装置である。調速機は回転速度などを検出し、規定値との偏差などから演算部で必要な制御信号を作って、パイロットバルブや配圧弁を介してサーボモータを動かし、ペルトン水車においては ，フランシス水車においては の開度を調整する。

上記の記述中の空白箇所(ア)，(イ)，(ウ)及び(エ)に当てはまる組合せとして、正しいものを次の(1)～(5)のうちから一つ選べ。

	(ア)	(イ)	(ウ)	(エ)
(1)	出力	上昇	ニードル弁	ガイドベーン
(2)	電圧	上昇	ニードル弁	ランナベーン
(3)	出力	下降	デフレクタ	ガイドベーン
(4)	電圧	下降	デフレクタ	ランナベーン
(5)	出力	上昇	ニードル弁	ランナベーン

導出のポイント

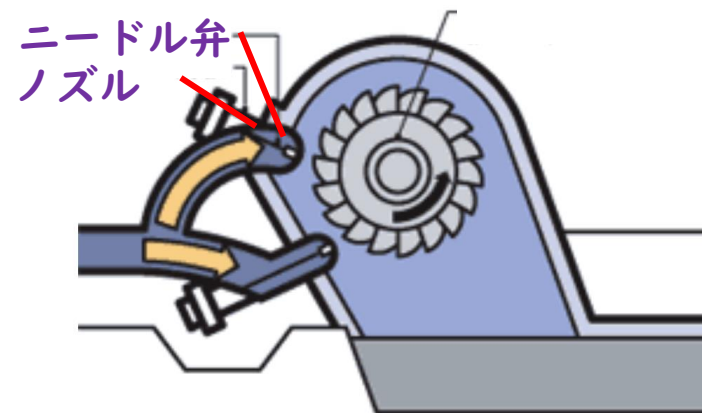
問1 次の文章は、水車の调速機の機能と構造に関する記述である。

水車の调速機は、発電機を系統に並列するまでの間においては水車の回転速度を制御し、発電機が系統に並列した後は **出力** (ア) を調整し、また、事故時には回転速度の異常な **上昇** (イ) を防止する装置である。调速機は回転速度などを検出し、規定値との偏差などから演算部で必要な制御信号を作って、パイロットバルブや配圧弁を介してサーボモータを動かし、ペルトン水車においては **ニードル弁** (ウ)、フランシス水車においては **ガイドベーン** (エ) の開度を調整する。

上記の記述中の空白箇所(ア)、(イ)、(ウ)及び(エ)に当てはまる組合せとして、正しいものを次の(1)～(5)のうちから一つ選べ。

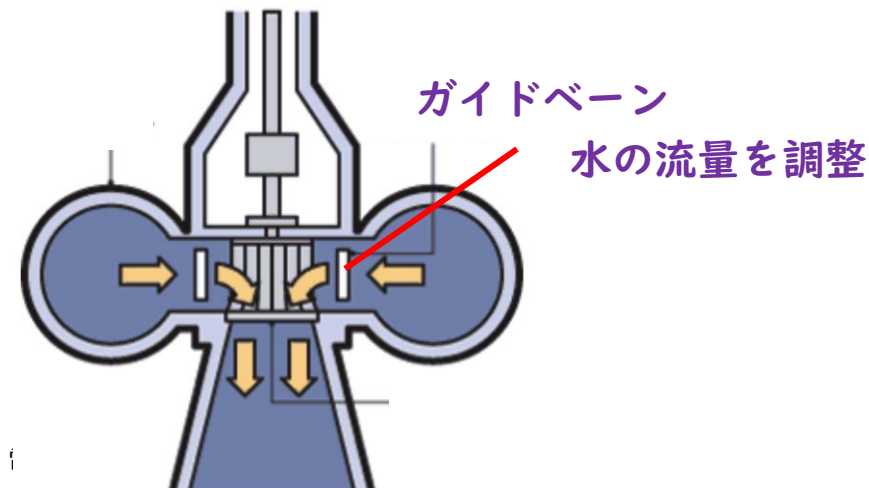
	(ア)	(イ)	(ウ)	(エ)
(1)	出力	上昇	ニードル弁	ガイドベーン
(2)	電圧	上昇	ニードル弁	ランナベーン
(3)	出力	下降	デフレクタ	ガイドベーン
(4)	電圧	下降	デフレクタ	ランナベーン
(5)	出力	上昇	ニードル弁	ランナベーン

ペルトン水車



ノズルの噴出口の開閉を行い、流量調整をする

フランシス水車



H19 問15

定格出力1000MW、速度調定率5%のタービン発電機と、定格出力300MW、速度調定率3%の水車発電機が電力系統に接続されており、タービン発電機は100%負荷、水車発電機は80%負荷をとって、定格周波数50Hzにて並列運転中である。

負荷が急変し、タービン発電機の出力が600MWで安定したとき、次の(a)及び(b)に答えよ。

(a) このときの系統周波数[Hz]の値として、正しいのは次のうちどれか。ただし、ガバナ特性は直線とする。なお、速度調定率は次式で表される。

$$\text{速度調停率 } R = \frac{\frac{n_2 - n_1}{n_n}}{\frac{P_1 - P_2}{P_n}}$$

P_1 : 初期出力[MW]
 P_2 : 変化後の出力[MW]
 P_n : 定格出力[MW]
 n_1 : 初期出力 P_1 における回転速度[min^{-1}]
 n_2 : 変化後の出力 P_2 における回転速度[min^{-1}]
 n_n : 定格回転速度[min^{-1}]

- (1) 49.5 (2) 50.0 (3) 50.3 (4) 50.6 (5) 51.0

(b) このときの水車発電機の出力の値[MW]として、最も近いのは次のうちどれか。

- (1) 40 (2) 80 (3) 100 (4) 120 (5) 180

導出のポイント

定格出力1000MW、速度調定率5%のタービン発電機と、定格出力300MW、速度調定率3%の水車発電機が電力系統に接続されており、タービン発電機は100%負荷、水車発電機は80%負荷をとって、定格周波数50Hzにて並列運転中である。

負荷が急変し、タービン発電機の出力が600MWで安定したとき、次の(a)及び(b)に答えよ。

(a) このときの系統周波数[Hz]の値として、正しいのは次のうちどれか。ただし、ガバナ特性は直線とする。なお、速度調定率は次式で表される。

$$\text{速度調停率 } R = \frac{\frac{n_2 - n_1}{n_n}}{\frac{P_1 - P_2}{P_n}}$$

P_1 : 初期出力[MW] n_1 : 初期出力 P_1 における回転速度[min^{-1}]
 P_2 : 変化後の出力[MW] n_2 : 変化後の出力 P_2 における回転速度[min^{-1}]
 P_n : 定格出力[MW] n_n : 定格回転速度[min^{-1}]

- (1) 49.5 (2) 50.0 (3) 50.3 (4) 50.6 (5) 51.0

タービン発電機の出カ

$$P_1 = 1000 \times 1.0 = 1000 \text{ MW} \rightarrow P_2 = 600 \text{ MW}$$

速度調停率

$$R = 0.05 = \frac{\frac{n_2 - n_1}{n_n}}{\frac{P_1 - P_2}{P_n}} = \frac{\frac{f_2 - f_1}{f_n}}{\frac{P_1 - P_2}{P_n}} = \frac{\frac{f_2 - 50}{50}}{\frac{1000 - 600}{1000}}$$

$$\frac{f_2 - 50}{50} = 0.05 \times \frac{1000 - 600}{1000} = 0.02$$

$$f_2 = 50 + 0.02 \times 50 = 51.0 \text{ Hz}$$

導出のポイント

定格出力1000MW、速度調定率5%のタービン発電機と、定格出力300MW、速度調定率3%の水車発電機が電力系統に接続されており、タービン発電機は100%負荷、水車発電機は80%負荷をとって、定格周波数50Hzにて並列運転中である。

負荷が急変し、タービン発電機の出力が600MWで安定したとき、次の(a)及び(b)に答えよ。

$$\text{速度調停率 } R = \frac{\frac{n_2 - n_1}{n_n}}{\frac{P_1 - P_2}{P_n}}$$

P_1 : 初期出力[MW] n_1 : 初期出力 P_1 における回転速度[min^{-1}]
 P_2 : 変化後の出力[MW] n_2 : 変化後の出力 P_2 における回転速度[min^{-1}]
 P_n : 定格出力[MW] n_n : 定格回転速度[min^{-1}]

(b) このときの水車発電機の出力の値[MW]として、最も近いのは次のうちどれか。

- (1) 40 (2) 80 (3) 100 (4) 120 (5) 180

水車発電機の出カ

$$P'_1 = 300 \times 0.8 = 240 \text{ MW} \rightarrow P'_2 = ? \text{ MW}$$

速度調停率

$$R' = 0.03 = \frac{\frac{n_2 - n_1}{n_n}}{\frac{P'_1 - P'_2}{P'_n}} = \frac{\frac{f_2 - f_1}{f_n}}{\frac{P'_1 - P'_2}{P'_n}} = \frac{\frac{51 - 50}{50}}{\frac{240 - P'_2}{300}}$$

$$\frac{51 - 50}{50} = 0.03 \times \frac{240 - P'_2}{300}$$

$$\frac{1}{50} = \frac{0.01}{100} \times (240 - P'_2)$$

$$2 = 2.4 - 0.01P'_2 \rightarrow 0.01P'_2 = 0.4 \rightarrow P'_2 = 40 \text{ MW}$$

H19 問15

定格出力1000MW、速度調定率5%のタービン発電機と、定格出力300MW、速度調定率3%の水車発電機が電力系統に接続されており、タービン発電機は100%負荷、水車発電機は80%負荷をとって、定格周波数50Hzにて並列運転中である。

負荷が急変し、タービン発電機の出力が600MWで安定したとき、次の(a)及び(b)に答えよ。

(a) このときの系統周波数[Hz]の値として、正しいのは次のうちどれか。ただし、ガバナ特性は直線とする。なお、速度調定率は次式で表される。

$$\text{速度調停率 } R = \frac{\frac{n_2 - n_1}{n_n}}{\frac{P_1 - P_2}{P_n}}$$

P_1 : 初期出力[MW]
 P_2 : 変化後の出力[MW]
 P_n : 定格出力[MW]
 n_1 : 初期出力 P_1 における回転速度[min^{-1}]
 n_2 : 変化後の出力 P_2 における回転速度[min^{-1}]
 n_n : 定格回転速度[min^{-1}]

- (1) 49.5 (2) 50.0 (3) 50.3 (4) 50.6 (5) 51.0

(b) このときの水車発電機の出力の値[MW]として、最も近いのは次のうちどれか。

- (1) 40 (2) 80 (3) 100 (4) 120 (5) 180

H27 問15

問15 定格出力1000MW、速度調定率5%のタービン発電機と、定格出力300MW、速度調定率3%の水車発電機が周波数調整用に電力系統に接続されており、タービン発電機は80%出力、水車発電機は60%出力をとって、定格周波数(60Hz)にてガバナフリー運転を行っている。

系統の負荷が急変したため、タービン発電機と水車発電機は速度調定率に従って出力を変化させた。次の(a)及び(b)の間に答えよ。

ただし、このガバナフリー運転におけるガバナ特性は直線とし、次式で表される速度調定率に従うものとする。また、この系統内で周波数調整を行っている発電機はこの2台のみとする。

$$\text{速度調定率} = \frac{\frac{n_2 - n_1}{n_n}}{\frac{P_1 - P_2}{P_n}} \times 100 [\%]$$

P_1 : 初期出力 [MW]

n_1 : 出力 P_1 における回転速度 [min^{-1}]

P_2 : 変化後の出力 [MW]

n_2 : 変化後の出力 P_2 における回転速度 [min^{-1}]

P_n : 定格出力 [MW]

n_n : 定格回転速度 [min^{-1}]

(a) 出力を変化させ、安定した後のタービン発電機の出力は900MWとなった。このときの系統周波数の値 [Hz] として、最も近いものを次の(1)~(5)のうちから一つ選べ。

- (1) 59.5 (2) 59.7 (3) 60 (4) 60.3 (5) 60.5

(b) 出力を変化させ、安定した後の水車発電機の出力の値 [MW] として、最も近いものを次の(1)~(5)のうちから一つ選べ。

- (1) 130 (2) 150 (3) 180 (4) 210 (5) 230

導出のポイント

問15 定格出力 1000 MW, 速度調定率 5 % のタービン発電機と, 定格出力 300 MW, 速度調定率 3 % の水車発電機が周波数調整用に電力系統に接続されており, タービン発電機は 80 % 出力, 水車発電機は 60 % 出力をとって, 定格周波数 (60 Hz) にてガバナフリー運転を行っている。

系統の負荷が急変したため, タービン発電機と水車発電機は速度調定率に従って出力を変化させた。次の(a)及び(b)の間に答えよ。

ただし, このガバナフリー運転におけるガバナ特性は直線とし, 次式で表される速度調定率に従うものとする。また, この系統内で周波数調整を行っている発電機はこの 2 台のみとする。

$$\text{速度調定率} = \frac{\frac{n_2 - n_1}{P_1 - P_2}}{P_n} \times 100 \text{ [%]}$$

P_1 : 初期出力 [MW]

n_1 : 出力 P_1 における回転速度 [min^{-1}]

P_2 : 変化後の出力 [MW]

n_2 : 変化後の出力 P_2 における回転速度 [min^{-1}]

P_n : 定格出力 [MW]

n_n : 定格回転速度 [min^{-1}]

(a) 出力を変化させ, 安定した後のタービン発電機の出力は 900 MW となった。このときの系統周波数の値 [Hz] として, 最も近いものを次の(1)~(5)のうちから一つ選べ。

- (1) 59.5 (2) 59.7 (3) 60 (4) 60.3 (5) 60.5

タービン発電機の出力

$$P_1 = 1000 \times 0.8 = 800 \text{ MW} \rightarrow P_2 = 900 \text{ MW}$$

速度調停率

$$R = 0.05 = \frac{\frac{n_2 - n_1}{P_1 - P_2}}{P_n} = \frac{\frac{f_2 - f_1}{f_n}}{\frac{P_1 - P_2}{P_n}} = \frac{\frac{f_2 - 60}{60}}{\frac{800 - 900}{1000}}$$

$$\frac{f_2 - 60}{60} = 0.05 \times \frac{800 - 900}{1000} = -0.005$$

$$f_2 = 60 - 0.005 \times 60 = 59.7 \text{ Hz}$$

導出のポイント

問15 定格出力 1000 MW、速度調定率 5 % のタービン発電機と、定格出力 300 MW、速度調定率 3 % の水車発電機が周波数調整用に電力系統に接続されており、タービン発電機は 80 % 出力、水車発電機は 60 % 出力をとって、定格周波数 (60 Hz) にてガバナフリー運転を行っている。

系統の負荷が急変したため、タービン発電機と水車発電機は速度調定率に従って出力を変化させた。次の(a)及び(b)の間に答えよ。

ただし、このガバナフリー運転におけるガバナ特性は直線とし、次式で表される速度調定率に従うものとする。また、この系統内で周波数調整を行っている発電機はこの 2 台のみとする。

$$\text{速度調定率} = \frac{\frac{n_2 - n_1}{n_n}}{\frac{P_1 - P_2}{P_n}} \times 100 \text{ [\%]}$$

P_1 : 初期出力 [MW]

n_1 : 出力 P_1 における回転速度 [min^{-1}]

P_2 : 変化後の出力 [MW]

n_2 : 変化後の出力 P_2 における回転速度 [min^{-1}]

P_n : 定格出力 [MW]

n_n : 定格回転速度 [min^{-1}]

(b) 出力を変化させ、安定した後の水車発電機の出力の値 [MW] として、最も近いものを次の(1)～(5)のうちから一つ選べ。

- (1) 130 (2) 150 (3) 180 (4) 210 (5) 230

水車発電機の出力

$$P'_1 = 300 \times 0.6 = 180 \text{ MW} \rightarrow P'_2$$

速度調停率

$$R' = 0.03 = \frac{\frac{n_2 - n_1}{n_n}}{\frac{P'_1 - P'_2}{P'_n}} = \frac{\frac{f_2 - f_1}{f_n}}{\frac{P'_1 - P'_2}{P'_n}} = \frac{\frac{59.7 - 60}{60}}{\frac{180 - P'_2}{300}}$$

$$\frac{180 - P'_2}{300} = \frac{1}{0.03} \times \frac{59.7 - 60}{60} = -0.167$$

$$P'_2 = 180 + 0.167 \times 300 = 230 \text{ MW}$$

H27 問15

問15 定格出力 1000 MW, 速度調定率 5 % のタービン発電機と, 定格出力 300 MW, 速度調定率 3 % の水車発電機が周波数調整用に電力系統に接続されており, タービン発電機は 80 % 出力, 水車発電機は 60 % 出力をとって, 定格周波数 (60 Hz) にてガバナフリー運転を行っている。

系統の負荷が急変したため, タービン発電機と水車発電機は速度調定率に従って出力を変化させた。次の(a)及び(b)の間に答えよ。

ただし, このガバナフリー運転におけるガバナ特性は直線とし, 次式で表される速度調定率に従うものとする。また, この系統内で周波数調整を行っている発電機はこの 2 台のみとする。

$$\text{速度調定率} = \frac{\frac{n_2 - n_1}{n_n}}{\frac{P_1 - P_2}{P_n}} \times 100 \text{ [\%]}$$

P_1 : 初期出力 [MW]

n_1 : 出力 P_1 における回転速度 [min^{-1}]

P_2 : 変化後の出力 [MW]

n_2 : 変化後の出力 P_2 における回転速度 [min^{-1}]

P_n : 定格出力 [MW]

n_n : 定格回転速度 [min^{-1}]

(a) 出力を変化させ, 安定した後のタービン発電機の出力は 900 MW となった。このときの系統周波数の値 [Hz] として, 最も近いものを次の(1)~(5)のうちから一つ選べ。

- (1) 59.5 (2) 59.7 (3) 60 (4) 60.3 (5) 60.5

(b) 出力を変化させ, 安定した後の水車発電機の出力の値 [MW] として, 最も近いものを次の(1)~(5)のうちから一つ選べ。

- (1) 130 (2) 150 (3) 180 (4) 210 (5) 230



ご聴講ありがとうございました!!