

水力発電の要点

(発送配変電二次説明問題に備える)

1.水車・発電機出力、2.水車の種類、3.比速度、4.キャビテーション、
5.水車の振動、6.水力発電所の試験、7.揚水発電の意義、8.発電電動機の
始動方法、9.可変速揚水、10.出力調整、11.試送電、12.環境対策、13.
経年水力発電所更新における設備簡素化等最近の技術動向

参考資料

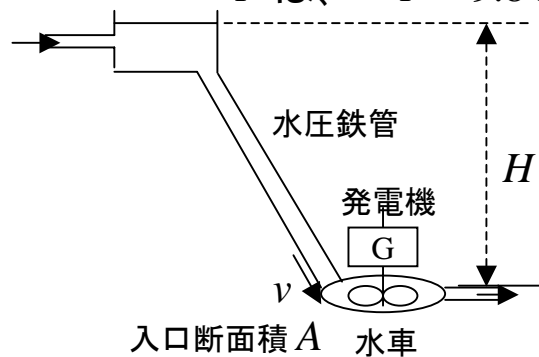
- 1.電気工学ハンドブック第6版
- 2.現代電力技術便覧
- 3.電気学会大学講座「水力発電」

1.水車・水力発電機の出力

例題 水力発電機の出力を表す式を書きなさい

$P = 9.8QH$, P :水車出力または発電機出力[kW], Q :流量[m³/s], H :有効落差[m],
:効率[pu:小数表示]、9.8は重力の加速度 g の近似値。 pu = per unit = %/100
= η_t =水車効率、または、 = $\eta_t \times \eta_g$ =水車効率×発電機効率

例題 流量60[m³/s]、有効落差150[m]、水車発電機合成効率85% のときの発電機出力
 P は、 $P = 9.8 \times 60 \times 150 \times 0.85 = 74,790$ [kW]



左図のような水路モデルで、水の密度を ρ とすれば、落差 H のもつ位置エネルギーがすべて運動エネルギーに転換されれば

$$\rho gH = \frac{1}{2} \rho v^2 \rightarrow v = \sqrt{2gH},$$

水路の損失等を考慮すると、 $v = k\sqrt{2gH} \propto H^{\frac{1}{2}}$

水車入口の断面積を A とすれば流量 Q は $Q = vA \propto H^{\frac{1}{2}} A \propto H^{\frac{1}{2}}$

\therefore 出力 P は、 $P = 9.8QH\eta \propto H^{\frac{3}{2}}$ 、すなわち、出力は落差の $\frac{3}{2}$ 乗に比例する。

水車の回転数 n は流速に比例するので、 $n \propto v \propto H^{\frac{1}{2}}$ 、 $\rightarrow P \propto H^{\frac{3}{2}} = (H^{\frac{1}{2}})^3 \propto v^3 \propto n^3$

すなわち、落差一定のとき、回転数が可変の場合は、出力は回転数の3乗に比例する。可変速発電電動機では一定周波交流で可変速となり、入出力が回転数の3乗に比例して変化する。同期速度で運転中は発電時には、 v 一定、出力は流量 $Q=vA$ A 、すなわちガイドベーン開度に比例する。同期速度回転の揚水機では、通常のスランシス型ポンプ水車の特性から、ポンプ入力を変えることは困難で一定入力でしか運転できない。→可変速揚水

代表的な水車の種類としては次の通り(下表参照)

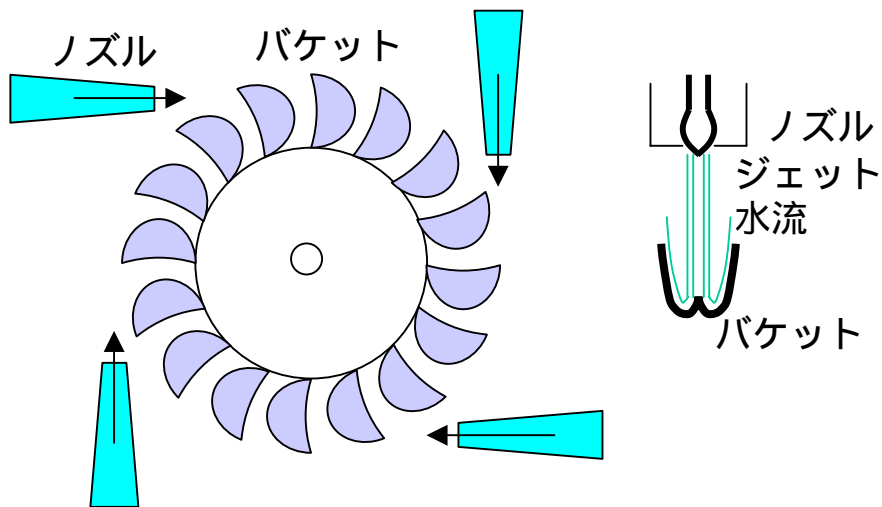
- (1)衝動水車であるペルトン水車
- (2)反動水車である フランシス水車、斜流水車、プロペラ水車
- (3)揚水発電用のポンプ水車としては反動水車が使用される。

注. 衝動水車は圧力水頭をすべて速度水頭のジェット水流に換えその衝撃力で回転し、反動水車は圧力水頭を羽根に作用させ水流の方向が羽根により変えられる反動で回転する。

		発電用水車形式名称	適用落差	比速度(p.6)の範囲(m-kW)	その他
水車	衝動水車	ペルトン水車	200～1000m超	$n_s \leq \frac{4300}{H+195} + 13$	バケットを配置したランナーに円周方向にジェット水流を噴射
		ターゴインパルス水車	90～600m	同上	バケットを配置したランナーに円周方向と25度の角度でジェット水流を噴射
		クロスフロー水車	30～80m	$90 \leq n_s \leq 100$	30枚程度の円弧型のブレードをかご形にしたランナーに軸と垂直方向から流入、中心から流出
	反動水車	フランシス水車	50～800m	$n_s \leq \frac{21000}{H+25} + 35$	
		斜流水車	20～180m	$n_s \leq \frac{20000}{H+20} + 40$	可動羽根は別名デリア水車
		プロペラ水車	5～90m	$n_s \leq \frac{21000}{H+20} + 35$	可動羽根は別名カプラン、円筒ケーシングはチューブラ水車
ポンプ水車	反動水車	フランシス型ポンプ水車	700m 級以下 700m 級超	$50 \leq n_s \leq 250$	700m 以下は単段ランナ、700m 超は多段ランナ
		斜流型ポンプ水車	10～150m	$100 \leq n_s \leq 300$	デリア型あり
		プロペラ型ポンプ水車	～15m	$100 \leq n_s \leq 300$	カプラン型あり

2.1 ペルトン水車

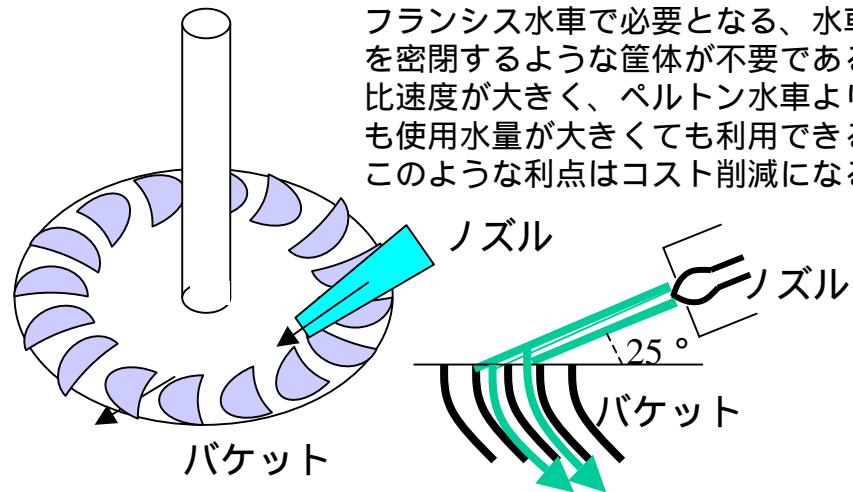
高落差用



2.2 ターゴインパルス水車

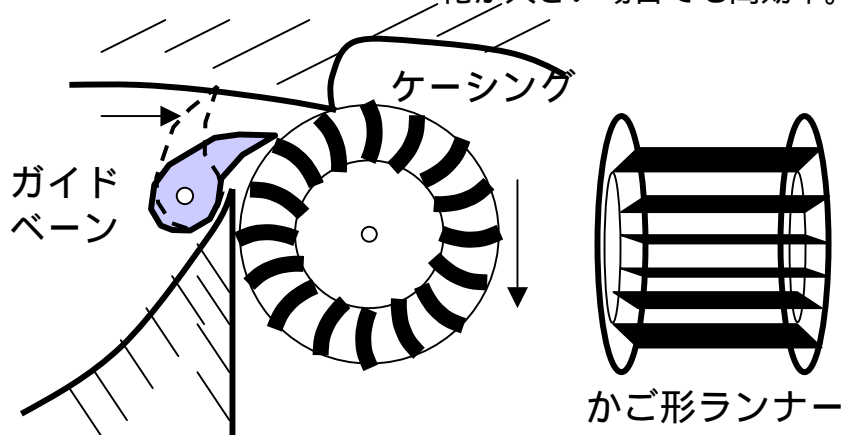
ペルトン水車の改良形

ターゴインパルス水車は衝動水車で、ペルトン水車よりも安価である。フランス水車で必要となる、水車を密閉するような筐体が不要である。比速度が大きく、ペルトン水車よりも使用水量が大きくても利用できる。このような利点はコスト削減になる。



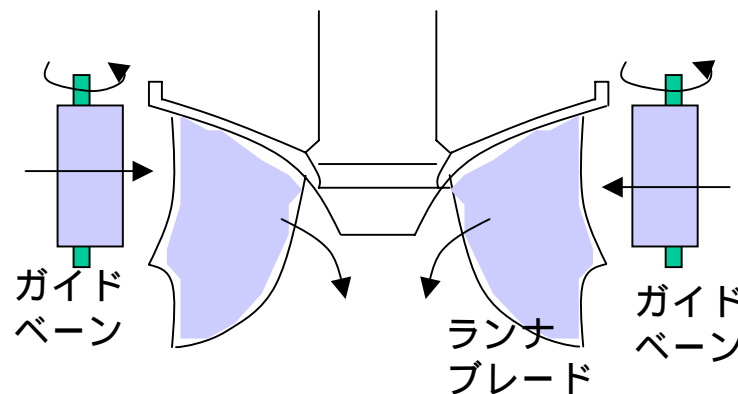
2.3 クロスフロー水車

小水力用として構造簡単、安価。水は円周方向に入り、円周方向に流出し、流量変化が大きい場合でも高効率。



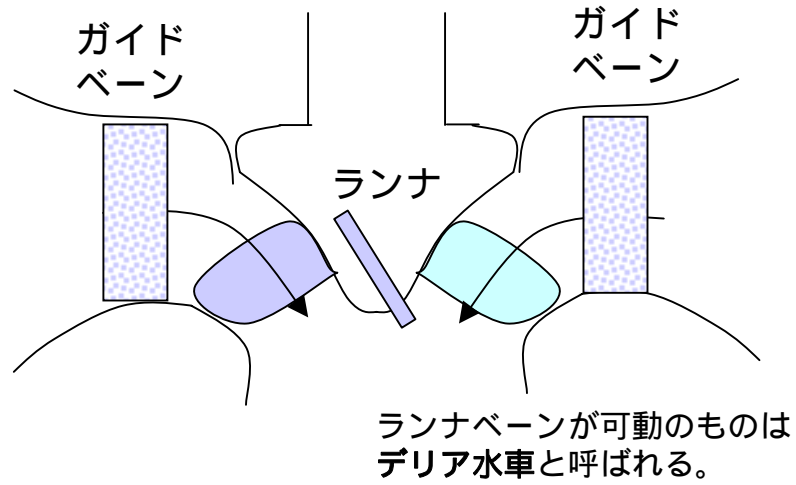
2.4 フランス水車

最も一般的な水車。
適用範囲広い



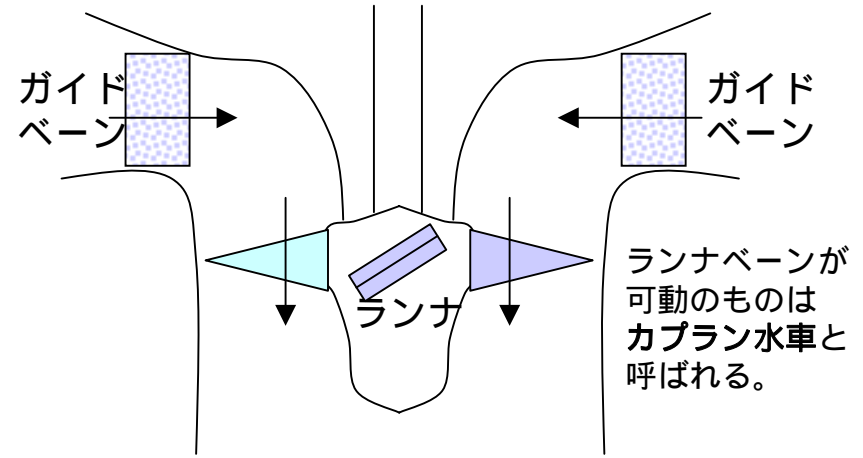
2.5 斜流水車

中落差用



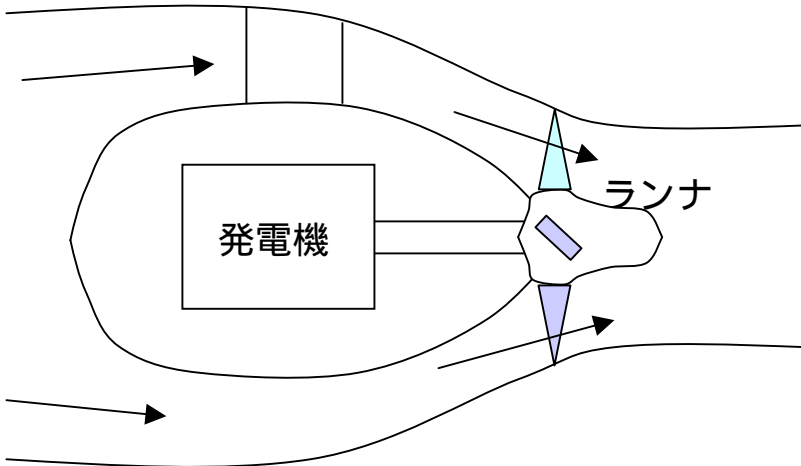
2.6 プロペラ水車

低落差用



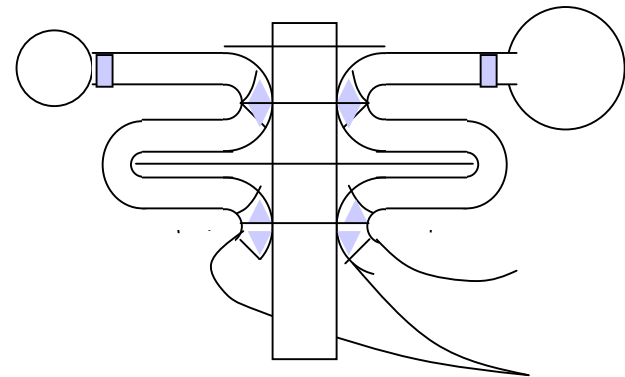
2.7 チューブラー水車

低落差用



2.8 2段フランシスポンプ水車

揚水発電所用



3.比速度

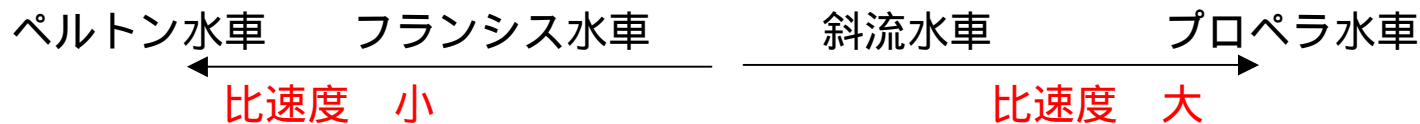
例題 比速度を表す式を書きその意味を説明せよ

水車の比速度とは、その水車と相似な水車を仮想して、1mの落差で1kWを発生するときの回転速度である。比速度には水車の型によって存在可能な範囲がある(p.3の表、下図参照)

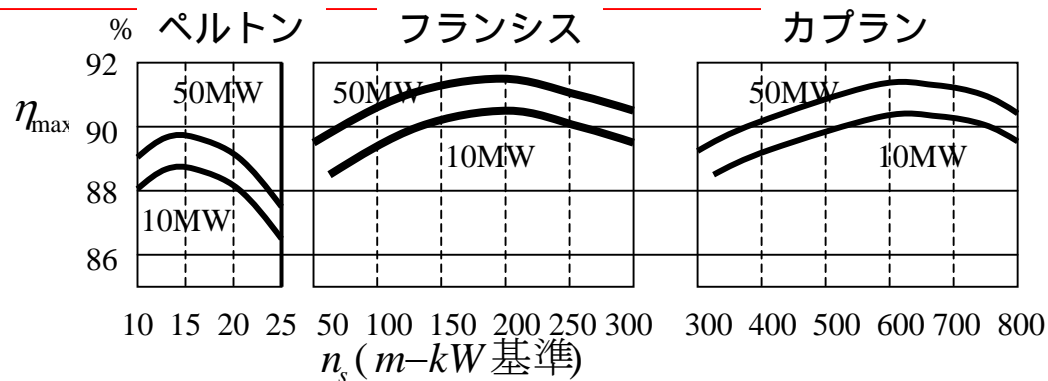
$n_s = n \times P^{1/2} / H^{5/4}$ (m-kW基準)、ただし、水車出力 P は、ペルトン水車ではノズル1個当たり、反動水車ではランナ1個当たりで、 H :有効落差、 n :回転速度である。(min⁻¹ = rpm, (m-kW) は次ページ以下参照)
 クロスフロー水車では、 $P = P_r / (B_g / D)$ 、 P_r :ランナ1個当たり出力、 B_g :ガイドベーン流路幅、 D :ランナ外径
 揚水用のポンプでは、 P の代わりに揚水量 Q を、 H としては全揚程とする。比速度を与えると、速度 n は、

$n = n_s \times H^{5/4} / P^{1/2}$ となる。 $p \geq 120f/n$ になるように p, n を決める。 f :周波数、 p :極数(偶数)。

出力 P が同じとき、低落差では、 n_s の低いペルトンではなく、 n_s の高いカプランを選ばないと、 n が低く過ぎ体積の大きい不経済な機械になる。高落差では、 n_s の高い水車にすると回転数が高すぎて遠心力に対する強度設計上不経済になるので n_s の低い水車を選ぶ。



水車の型別最高効率と比速度の関係概略(右図)それぞれの適正範囲内に最高効率の最大値がある。



(挿入) 参考 比速度の式の導出その1

1. 水車の大きさをランナーの直径など代表的な部分の長さで表し L [m] とする。大きさを変えるときは相似形を保つ条件とする。

2. 出力を P [kW], 流量を Q [m^3/s], 落差を H [m], 流速を v [m/s], 回転速度を N [rpm] (or [rps]) とする。

($rpm = \text{min}^{-1}$, $rps = s^{-1}$)。すると、次式が成り立つ。ペルトン水車1ノズルをイメージするとわかり易い。

$$\textcircled{1} v \propto H^{\frac{1}{2}} (\leftarrow \sqrt{2gH})$$

$$\textcircled{2} Q \propto \text{水流断面積} \times \text{流速} \propto L^2 v$$

$$\textcircled{3} P \propto QH$$

$$\textcircled{4} v \propto \text{円周} \times \text{回転速度} \propto LN$$

この4つの式から v, L を消去し、さらに、 $H = 1$ [m], $P = 1$ [kW] のときの回転速度 N_s を求める。

①式と④式から v を消去すると、

$$v \propto H^{\frac{1}{2}} \propto LN \rightarrow L \propto H^{\frac{1}{2}} N^{-1} \dots \textcircled{5}$$

これを②式、③式に代入して、

$$P \propto QH \propto L^2 v H \propto \left(H^{\frac{1}{2}} N^{-1} \right)^2 H^{\frac{1}{2}} H = N^{-2} H^{\frac{5}{2}}$$

すなわち、 $N^2 P H^{-\frac{5}{2}}$ は一定……⑥

したがって平方根の $N P^{\frac{1}{2}} H^{-\frac{5}{4}}$ も一定…⑦

落差 $H = 1$ [m], 出力 $P = 1$ [kW] のとき

N を N_s と書けば、

$$N P^{\frac{1}{2}} H^{-\frac{5}{4}} = N_s (1)^{\frac{1}{2}} (1)^{-\frac{5}{4}} (= N_s) \dots \textcircled{8}$$

すなわち、

$$N_s = N P^{\frac{1}{2}} H^{-\frac{5}{4}} / (1)^{\frac{1}{2}} (1)^{-\frac{5}{4}} = N P^{\frac{1}{2}} H^{-\frac{5}{4}} \dots \textcircled{9}$$

が得られる。

⑨式から分るように、 $P^{\frac{1}{2}} H^{-\frac{5}{4}} / (1)^{\frac{1}{2}} (1)^{-\frac{5}{4}}$ は無次元であるから、 N_s と N との次元が等しく、また、単位も等しい (rpm, rps など)。

一方、⑧式を再掲すれば、 N_s が得られる。

$$N_s = N_s (1)^{\frac{1}{2}} (1)^{-\frac{5}{4}} = N P^{\frac{1}{2}} H^{-\frac{5}{4}} \dots \textcircled{8} \text{ p.10} \sim$$

比速度の単位として $[m \cdot kW]$ と書く例が見られるが、正しくは $(m-kW)$ と表して、 N_s の単位ではなく、落差の単位が $[m]$ 、出力の単位が $[kW]$ であることを表す (JIS B0119, p.21)。回転速度としての N_s の単位は N と同じで、 $[\text{min}^{-1}] (=rpm)$ である。一方、式の N_s が相似水車に共通な水車の型の指標として単位表記なしで使用されている (JEC4001 ($m-kW$ 基準) のみ表示)。

挿入2, 比速度の式の導出その2 (別法)

2つの相似な水車の大きさをランナーの直径など代表的な長さで表しそれぞれ L_1, L_2 [m] とする。出力を P_1, P_2 [kW], 流量を Q_1, Q_2 [m^3/s], 落差を H_1, H_2 [m], 流速を V_1, V_2 [m/s], 回転速度を N_1, N_2 [rpm] (or [rps]) とする。(rpm = min^{-1} , rps = s^{-1}) すると、次式が成り立つ。ペルトン水車1ノズルをイメージするとわかり易い。

$$\textcircled{1} \frac{V_2}{V_1} = \frac{\sqrt{H_2}}{\sqrt{H_1}}, \quad \textcircled{2} \frac{Q_2}{Q_1} = \frac{L_2^2 V_2}{L_1^2 V_1}, \quad \textcircled{3} \frac{P_2}{P_1} = \frac{Q_2 H_2}{Q_1 H_1},$$

$$\textcircled{4} \frac{V_2}{V_1} = \frac{L_2 N_2}{L_1 N_1}$$

$$\textcircled{1} \text{と} \textcircled{4} \text{式から} \frac{L_2 N_2}{L_1 N_1} = \frac{H_2^{1/2}}{H_1^{1/2}} \rightarrow \frac{L_2}{L_1} = \frac{N_2^{-1} H_2^{1/2}}{N_1^{-1} H_1^{1/2}}$$

これを②式、③式に代入して、

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \left(\frac{N_2^{-1} H_2^{1/2}}{N_1^{-1} H_1^{1/2}} \right)^2 \frac{H_2^{1/2}}{H_1^{1/2}} = \frac{N_2^{-2} H_2^{3/2}}{N_1^{-2} H_1^{3/2}} \dots \textcircled{6}$$

比速度の単位として $[m \cdot kW]$ と書く例が見られるが、正しくは $(m-kW)$ と表して、 N_s の単位ではなく、落差の単位が [m]、出力の単位が [kW] であることを表す (JIS B0119, p.21)。回転速度としての N_s の単位は N と同じで、 $[\text{min}^{-1}] (=rpm)$ である。一方、式の N_s が相似水車に共通な水車の型の指標として単位表記なしで使用されている (JEC4001 ($m-kW$ 基準) のみ表示)。

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{Q_2 H_2}{Q_1 H_1} = \frac{N_2^{-2} H_2^{5/2}}{N_1^{-2} H_1^{5/2}}, \rightarrow \frac{N_2^2 P_2 H_2^{-5/2}}{N_1^2 P_1 H_1^{-5/2}} = 1 \dots \textcircled{7}$$

これから、平方根をとると、

$$N_2 \sqrt{P_2} / H_2^{5/4} = N_1 \sqrt{P_1} / H_1^{5/4}$$

落差 $H_2 = 1$ [m], 出力 $P_2 = 1$ [kW] のとき

$$N_2 = N_s', N_1 = N, P_1 = P, H_1 = H \text{ とすれば、}$$

$$N \sqrt{P} / H^{5/4} = N_s' \sqrt{(1)} / (1)^{5/4} (= N_s'), \dots \textcircled{8} \text{すなわち、}$$

$$N_s' = N \sqrt{P} / H^{5/4} / \sqrt{(1)} / (1)^{5/4} = N \sqrt{P} / H^{5/4} \dots \textcircled{9}$$

が得られる。

上式から分るように、 $\sqrt{P} / H^{5/4} / \sqrt{(1)} / (1)^{5/4}$ は無次元であるから、 N_s' と N との次元が等しく、もともと、回転速度どうして単位も等しい (rpm, rps など)。

一方、⑧式を再掲すれば、 N_s が得られる。

$$N_s = N_s' (1)^{1/2} (1)^{-5/4} = N P^{1/2} H^{-5/4} \dots \textcircled{8} \text{ p.10へ}$$

挿入3. 比速度の式の導出その3 (Wkp投稿)

1. 実物水車の出力を P [kW], 流量を Q [m^3/s], 落差を H [m], 流速を V [m/s], 回転速度を N [rpm](or [rps]) とする。

2. 実物水車と相似で、長さの比が k 倍である相似水車について、出力を P_k [kW], 流量を Q_k [m^3/s], 落差を H_k [m], 流速を V_k [m/s], 回転速度を N_k [rpm] (or [rps]) とする。(rpm = min^{-1} , rps = s^{-1} である。)

すると、次式が成り立つ。ペルトン水車1ノズルをイメージするとわかり易い。

$$\begin{aligned} \textcircled{1} \quad \frac{V_k}{V} &= \frac{\sqrt{H_k}}{\sqrt{H}} \quad (\Leftarrow \sqrt{2gH}) \\ &= k \frac{N_k}{N} \quad (\Leftarrow \text{円周} \times \text{回転速度}) \end{aligned}$$

$$\text{以上から、} \quad k = \frac{N}{N_k} \frac{V_k}{V} = \frac{N \sqrt{H_k}}{N_k \sqrt{H}}$$

$$\begin{aligned} \textcircled{2} \quad \frac{Q_k}{Q} &= k^2 \frac{V_k}{V} \quad (\Leftarrow \text{水流断面積} \times \text{流速}) = k^2 \frac{\sqrt{H_k}}{\sqrt{H}} \\ &= \frac{N^2 H_k^{3/2}}{N_k^2 H^{3/2}} \end{aligned}$$

$$\textcircled{3} \quad \frac{P_k}{P} = \frac{Q_k H_k}{QH} \quad (\Leftarrow P \propto QH) = \frac{N^2 H_k^{5/2}}{N_k^2 H^{5/2}}$$

$$\frac{P_k}{P} = \frac{Q_k H_k}{QH} = \frac{N^2 H_k^{5/2}}{N_k^2 H^{5/2}} \Rightarrow \therefore N_k^2 \frac{P_k}{H_k^{5/2}} = N^2 \frac{P}{H^{5/2}}$$

平方根をとると

$$N_k \frac{\sqrt{P_k}}{H_k^{5/4}} = N \frac{\sqrt{P}}{H^{5/4}} \dots \textcircled{4} \quad (\Rightarrow N_k \text{ は } N \text{ と同次元})$$

$H_k = 1$ [m], $P_k = 1$ [kW] のとき、 $N_k = N_s'$ と書けば、

$$N_s' \times \frac{\sqrt{1}}{1^{5/4}} = N \frac{\sqrt{P}}{H^{5/4}} (= N_s) \dots \textcircled{5} \quad p.10 \sim$$

比速度の単位として $[m \cdot kW]$ と書く例が見られるが、正しくは $(m-kW)$ と表して、 N_s の単位ではなく、落差の単位が [m]、出力の単位が [kW] であることを表す (JIS B0119, p.21)。回転速度としての N_s の単位は N と同じで、 $[\text{min}^{-1}] (= \text{rpm})$ である。一方、式の N_s が相似水車に共通な水車の型の指標として単位表記なしで使用されている (JEC4001 ($m-kW$ 基準) のみ表示)。

比速度の意味と単位等の表示について

挿入1、挿入2の⑧式を再掲すると、

$$NP^{\frac{1}{2}}H^{-\frac{5}{4}} = N'_s(1)^{\frac{1}{2}}(1)^{-\frac{5}{4}} = N_s \dots\dots \textcircled{8}$$

これから、

$$N_s = NP^{\frac{1}{2}}H^{-\frac{5}{4}} \dots \textcircled{10}$$

が得られる。この N_s は、⑧式からわかるように⑨式の N'_s と値は同じだが式の形から見て回転速度の次元ではない。

挿入3の④⑤式からは

$$N_s = N_k P_k^{\frac{1}{2}} H_k^{-\frac{5}{4}} = NP^{\frac{1}{2}} H^{-\frac{5}{4}} \dots \textcircled{11}$$

が得られる。この N_s は、⑩式と同じであるが④⑤式からわかるように⑥式の N'_s と値は同じだが式の形から見て次元は回転速度ではない。

⑩式と⑪式は同じ式であるから、以下⑪式を代表として考える。

⑪式は、 k がいろいろな数に変わっても、すなわちこの実物水車と相似なすべての水車について

$N_k P_k^{\frac{1}{2}} H_k^{-\frac{5}{4}}$ を作るとその値は一定値 N_s になることを示している。

すなわち、 N_s はこの相似な水車群に共通な固有の数値であるから、その形を表す指標として使用することができる。そこで、あらためて、 N_s を比速度と名づけ水車の形を表す指標とする。そして、その値は、相似水車の単位落差、単位出力時の回転数に等しい数値でもある。

相似水車については、 N_k, P_k, H_k のうち二つを与えると残り一つが求められる。

比速度の次元は、 N の次元は T^{-1} 、 P は ML^2T^{-3} 、

H は L から、 $M^{\frac{1}{2}}L^{\frac{1}{4}}T^{\frac{5}{2}}$ であり、これは、定数

$\rho^{\frac{1}{2}}g^{\frac{5}{4}}$ ($\rho: ML^{-3}$, $g: LT^{-2}$)の次元に等しく変数の

次元を含まないので、準無次元であり、実質無次元とみなせるので特に単位を付けないことに

し、 N_s の算出に必要な H 、 P の単位だけを、

($m-kW$)または($m-kW$ 基準)として附記しておく方式が、*JISB0119*、*JEC4001*において採用されている。

発生原因 ベルヌーイの定理により、流速が速い部分では圧力が低く、流速が遅い部分では圧力が高い。水車の流水中の、圧力が低い部分で発生した真空に近い気泡が流速の遅い部分に達した時、強い水圧で潰され水車羽根等に衝撃を受ける。これが繰り返されるとランナー表面など構造物表面に多数のあばた状のくぼみ(壊食)ができる。これがキャビテーションである。

キャビテーションによる障害

効率、出力、水量が減少する。

キャビテーション発生場所に壊食が起きる。

吸出し管入口の圧力変動が大きくなる。

発生防止対策

設計に当たって適正な比速度を選定する。

各部分の流速をできるだけ均一にする(形状の改良、水の旋回運動の防止など)。

吸出し管入口など低圧部に空気を注入する。

過度の部分負荷、過負荷運転を避ける。

基本は、キャビテーション係数 σ を初生値(キャビテーション発生開始する値) σ_i 以下に保つ

対抗力増大方策

強い材料の選定

表面仕上げをよくする。

定期的な検査と補強・補修。

$$\sigma = \frac{NPSH}{H}; NPSH (\text{Net Positive Suction Head 有効吸入ヘッド})$$

$$NPSH = \text{大気圧} + \text{飽和蒸気圧} - \text{吸出し高さ} - A - h_{v2}$$

A:ランナ指定位置と水車 指定位置との標高差

h_{v2} : 低圧側指定点における 速度水頭

H: 有効落差、または全揚程

発生原因と対策 水車の振動には、水力的原因によるものと機械的原因によるものがある。

(1)水力的原因によるもの

ランナ入口の圧力変動によるもの

原因 ガイドベーン枚数とランナーベーン枚数の相互干渉によるもの

対策 $Z_g - Z_r \pm 1$ となるようにする。 Z_g 、 Z_r はガイドベーン、ランナベーン枚数

ランナ、ステーベーンなど出口のカルマン渦によるもの

原因 流れに対し物体の裏側に発生する渦で流れに直角な振動を生じる。

対策 ランナベーンの形状修正、板厚修正

吸出し管内の旋回流によるもの

原因 ランナを出た水が持つ旋回エネルギーが渦流となる。部分負荷で大。

対策 吸出し管内に空気を導入したりフィンをつけたりする。

(2)機械的原因によるもの

回転体としての不均衡

原因 設計製作上の問題

対策 設計製作段階の精度向上

軸受け、その他組立における調整不良

原因 調整不良

対策 調整制度の向上

軸受け支持位置・軸受けギャップの不適

原因 設計・製作時の問題

対策 設計・製作の精度向上

6.水力発電所の試験

例題 水力発電所の主要な試験の種類と目的を説明せよ。

(1-1)(発電時)負荷遮断試験

(1-2)ポンプ水車入力遮断試験

この二つは類似の目的で行われる

試験方法 正常運転中に系統から解列し、调速機応答、ガイドベーン応答、水圧、回転数、電圧などの時間的推移を測定する。

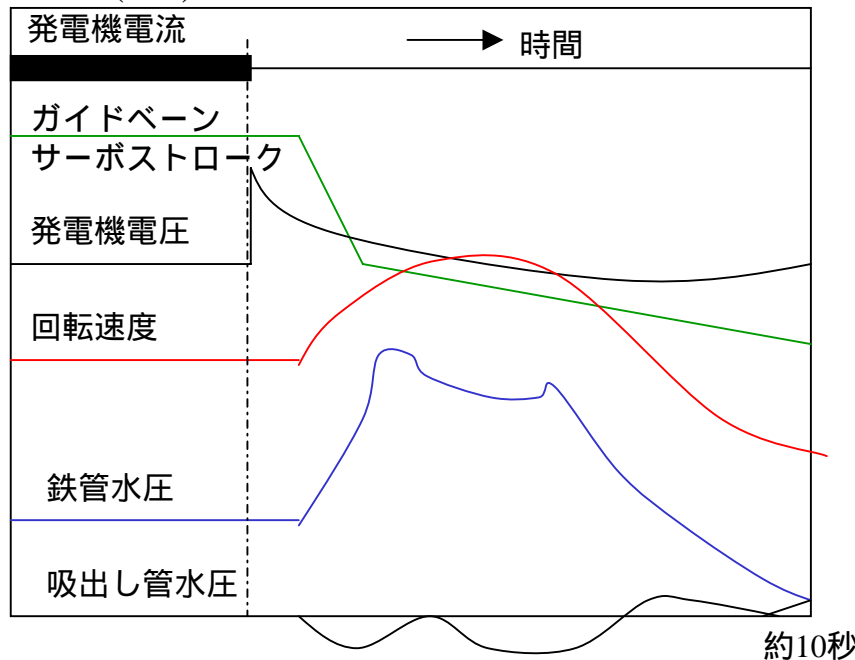
(1-1) 1/4負荷からはじめ、2/4、3/4、4/4負荷と順次負荷を増やして行う。

(1-2)通常、100%負荷で揚水中に行う。

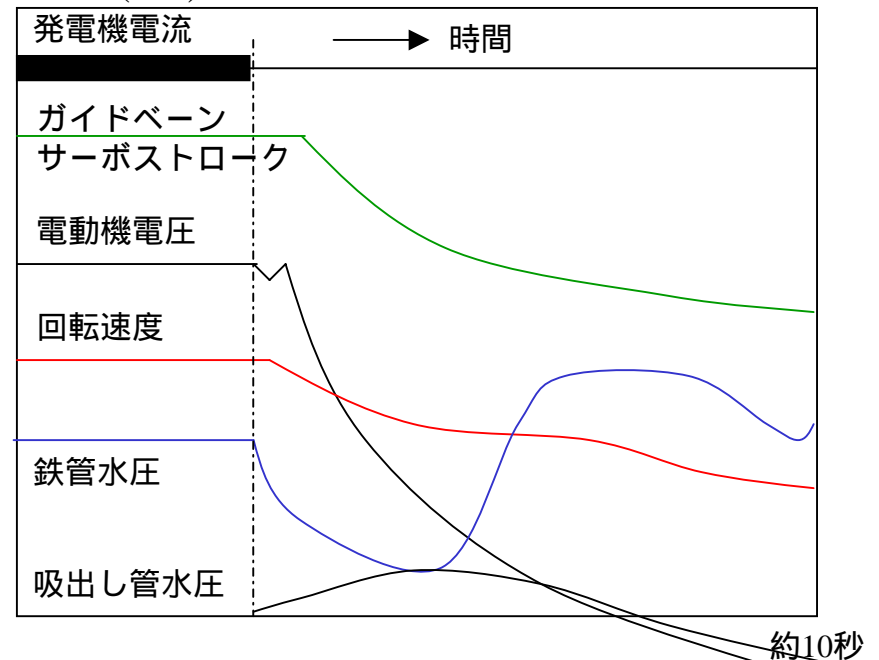
目的 正常運転中に系統から解列した時に安全に停止し得ることを確認する。

水圧変動率、速度変動率、電圧変動率ガイドベーン開度などの応答・変動を確認する。

(1-1)発電機負荷遮断試験



(1-2)ポンプ水車入力遮断試験



(2)(発電時)非常停止試験

試験方法 正常運転中に電気機器の故障リレーなどで、主変、発電機などトリップさせる。
1/4負荷程度の負荷で行う。

目的 機器異常によるトリップが正常に行われることの確認である。
遮断器の開放等必要な動作が正常に行われるかどうかを検証する。

(3) 負荷試験

試験方法 4/4負荷で長時間運転を続け、温度上昇、その他異常の有無を確認する。

目的 100%負荷を担い得ることの確認である。

(4)竣工時の試験

a.無水試験

接地抵抗測定、絶縁抵抗測定、水車・発電機動作試験、補機試験、遮断器・開閉器関係試験
保護装置試験、非常用予備装置試験

b.有水試験

通水検査、初回転試験、発電機特性試験、自動始動停止試験(配電盤から操作)、負荷遮断・
入力遮断試験・非常停止試験(既出)、無負荷無励磁試験、負荷急増試験(サージタン
ク水位変動)、監視制御試験、負荷試験・入力試験(既出)、騒音測定、振動測定、水車・ポン
プ効率測定、

c.使用前検査

河川法30条関係の立会い検査

電気事業法50条関係の使用前自主検査 上記竣工時の検査の自主検査

6.水力発電所の試験 続2

1.最高無拘束速度

全負荷運転中に負荷遮断を行いガイドベーン (orノズル)全開のままにして最高速度を求める。水車は、最高無拘束速度に1分間耐えなければならない。

2.調速機 (ガバナー) 関係

①速度変動率 δ_n

全負荷遮断時の速度変動率で、

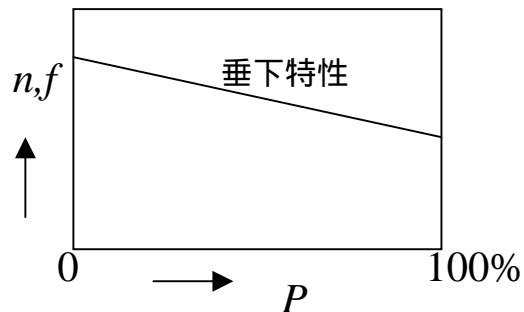
$$\delta_n = \frac{n_{\max} - n_0}{n_n}, \quad n_x \text{は回転速度} [\text{min}^{-1}] \text{で、} n_{\max} = \text{最高、} n_0 = \text{遮断前、} n_n = \text{定格 である。}$$

②速度調停率 δ

発電機の負荷を変化させた場合の、単位出力変化率当りの速度変化率をいう。

$$\delta = \frac{\frac{n_1 - n_2}{n_n}}{\frac{P_1 - P_2}{P_n}} = \frac{\Delta n / n_n}{\Delta P / P_n} = \frac{\Delta f / f_n}{\Delta P / P_n}, \quad n \text{は回転速度} [\text{min}^{-1}], P \text{発電機出力、} f \text{は周波数、} \Delta \text{は差分}$$

通常、負荷が増加すれば回転数(周波数)が下がるように設定する(垂下特性)



3.負荷遮断試験

負荷遮断試験では、速度変動率（前出）、水圧変化率、電圧変化率がある。

①速度変動率 δ_n

全負荷遮断時の速度変動率で、

$$\delta_n = \frac{n_{\max} - n_0}{n_n}, \quad n_x \text{は回転速度} [\text{min}^{-1}] \text{で、} n_{\max} = \text{最高、} n_0 = \text{遮断前、} n_n = \text{定格 である。}$$

②水圧変動率 δ_H

発電機の負荷を遮断した場合の、水圧の変化率をいう。

$$\delta_H = \frac{p_{\max} - p_0}{p_H}, \quad p \text{は水圧} [m], \text{で、} p_{\max} = \text{最高、} p_0 = \text{停止時水車中心、} p_H = \text{静落差 である。}$$

③電圧変動率

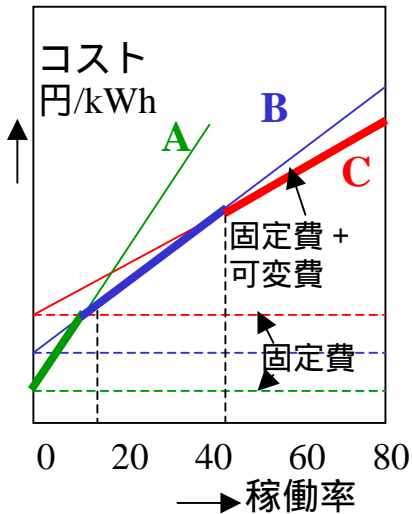
発電機の負荷を遮断した場合の、電圧の変化率をいう。

$$\delta_v = \frac{V_{\max} - V_n}{V_n}, \quad V \text{は電圧} [V], \text{で、} V_{\max} = \text{最高、} V_n = \text{定格電圧である}$$

7.揚水発電の意義

例題 最近の水力開発では揚水発電が主となっているがその理由を述べよ。

最近の代表的な日負荷曲線は右図のような形で、ベース部分ピーク部分およびその中間のミドル部分に分けることができる。



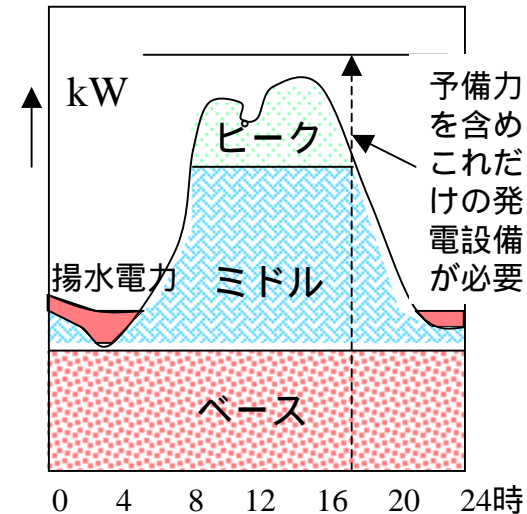
固定費は、稼働率に無関係に必要な設備費など、可変費は燃料費など稼働率にほぼ比例するコスト。

3区分した負荷に対しどのような電源が適しているかはコスト最低線をつないだ、左図の太線で示すように、固定費が安く可変費が高い電源(A)を利用率の低いピーク用に当て、固定費は高いが可変費が安い電源(C)をベース用に当て、中間部分に、固定費、可変費とも中間の電源(B)を当てることにより、全体コストが最小になる。

ベース用電源としては、燃料費が低い原子力、石炭火力、その他高効率火力があり、ピーク用としては固定費が低いガスタービン発電、償却の進んだ経年火力、貯水池、調整池を持つ水力と並んで揚水発電がある。(ミドルはその他電源)

揚水発電は、耐用年数が数十年と長いので、固定費が低い、下池から上池にポンプアップするのに電力を使いその効率が揚水、発電計で70%程度であることから可変費は高くなる。

日負荷曲線



すべての電源を負荷曲線に比例させるのではなく、左図のように各種電源の特性を活かした運用が全体コストを下げる。

揚水発電は、上記のような経済的特性に加え、起動停止時間が短く、出力調整が容易であることから、周波数維持にも便利であり、しかも、年末年始や、ゴールデンウィークのように深夜負荷が極端に低い時にも最低負荷運転する大容量火力や一定負荷運転の原子力の余剰電力を使って揚水することによりこれらの運転を維持・継続することができる。

わが国では、調整池式や貯水池式の水力発電の開発が進み、一般水力地点が枯渇状況にあることも、揚水発電の開発を促進する原因となっている。

まとめると、**ピーク供給力の経済的確保** **運用特性** **深夜余剰の活用** **一般水力地点の枯渇**である。

共通事項

揚水運転を開始する事前準備として、入口弁、ガイドベーンを閉じ、圧縮空気で吸出し管内の水面を押し下げておく。これはポンプ負荷を軽くして起動しやすくするためである。ランナをポンプ方向に回転できる回路に変更して回転開始し、定格速度になると圧縮空気を排出し**ポンプ締め切り運転**に移行する。このときの圧力が最大許容水圧を超えないよう事前に検討しておく。その後、入口弁を開き、ガイドベーンを徐々に開けて揚水が開始される。

始動方式6つとその概要

- | | |
|---------|--|
| 制動巻線始動 | 制動巻線を二次巻線とするかご形誘導電動機として始動。滑りが約1%になった時励磁し系統に並列する。 |
| 同期始動 | 他の同期発電機を励磁を与えた発電電動機に接続、回転速度を0から徐々に上げ定格速度付近で系統に並列、発電機は解列する。 |
| 直結電動機始動 | 巻線型誘導電動機など速度調整の容易な誘導電動機に機械的に直結して始動し定格速度付近で励磁を加え系統に並列する。 |
| サイリスタ始動 | 発電電動機に励磁を与え、サイリスタ逆変換装置から電力を供給し、周波数を0から徐々に上げ定格速度付近で系統に並列する。 |
| 低周波始動 | と を組み合わせた方式である。誘導電送機として起動し速度が約80%になった時、他の始動用同期発電機と並列し、速度がほぼ等しくなった時励磁を与え、その後は と同様にする。 |
| 組合せ始動 | 機器台数が多い発電所で、 と を組み合わせるなど上記の組合せ方式である。 |

8. 発電電動機の始動方式続き（各方式の比較）

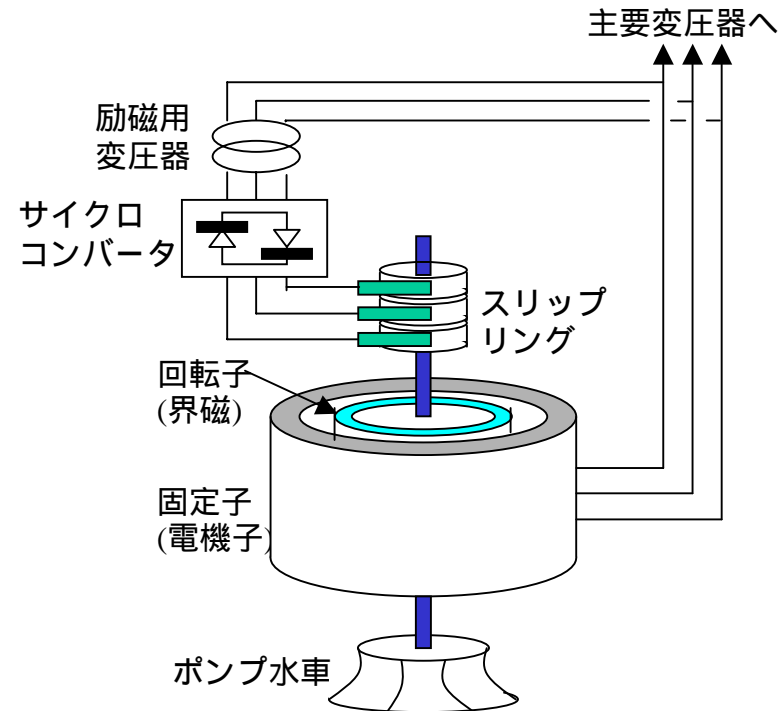
比較事項		①	②	③	④	⑤	⑥
		制動巻線 始動方式	同期始動 方式	直結電動機 始動方式	サイリスタ 始動方式	低周波始 動方式	組合せ始 動方式
1	対象単機容量	中小	大中	大	大	大中	大
2	台数	無影響	多数向き	少数向き	多数向き	多数向き	多数向き
3	自己始動	可能	なし	可能	可能	なし	方式次第
4	系統への影響	大	なし	少ない	少ない	なし	少ない
5	所要始動用付属 設備	開閉器	発電機	電動機	サイリスタ変 換装置	②とほぼ同 じ	方式次第
		母線	母線	抵抗器			
			開閉器	開閉器	開閉器		
			励磁装置	変圧器	励磁装置		
6	始動用電源容量	不要	15～20%以 上	5～8%	15～20%以 上	②とほぼ同 じ	方式次第
7	所要時間	短い	短い	比較的長	比較的長	短い	方式次第
8	主回路の制御	簡単	複雑	簡単	簡単	複雑	複雑
9	制御回路	簡単	複雑	複雑	複雑	複雑	複雑
電気工学ハンドブックを参考に編成							

原理的には、巻線型誘導電動機の滑り周波数 sf に相当する低周波数で回転子側を励磁することにより、回転速度が同期速度の $1-s$ 倍になることを利用し、夜間の揚水電動機負荷を加減（回転速度の3乗に比例する入力になる）し、夜間低負荷時(頻繁な出力調整が困難な原子力や大容量火力などの比率が高い時間帯)の周波数制御に揚水電動機を活用する。
 s としては、同期速度の $\pm 10\%$ 程度が採用されている。

低周波交流の供給方法

サイクロコンバータ方式が一般的である。

サイクロコンバータとは、元来は巻線型誘導電動機の一次と二次と同様な関係で周波数変換を行う交流の回転機のことであったが、現在では、半導体を用い、ある周波数の交流から、直流を介することなく、直接、別の周波数の交流を出力する機器のことを指している。この場合は商用周波数の50,60Hzから、0~5Hz, 6Hzの交流に変換する機器である。

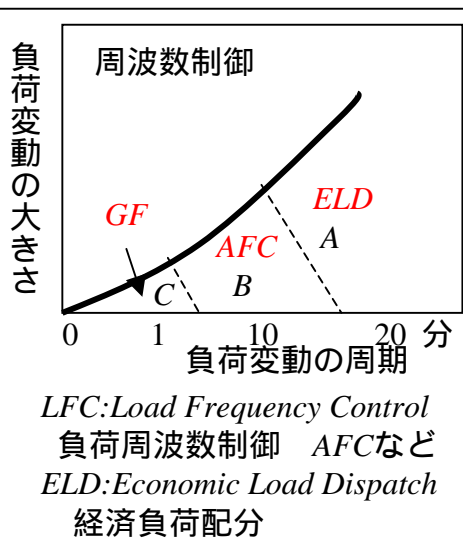


可変速発電電動機により、夜間低負荷時の周波数制御容量が確保されるほか、発電時の部分負荷運転の効率が向上し、部分負荷での振動が減少するなどの効果がある。

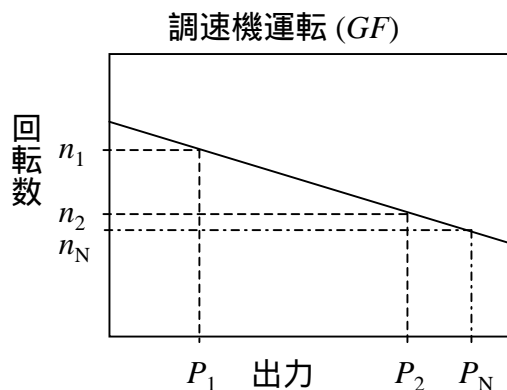
10. 出力調整

例題 水力発電所の出力調整方法を説明せよ

水力発電機の出力は、落差が一定の場合流量に比例するから、ガイドベーンの開度(p.2参照)を調整すれば出力が変更できる。



供給が需要を上回れば周波数が上がり、下回れば周波数が下がるので、電力需給は周波数を一定に保つことによって確保される。負荷変動を周期で分けると、数分以下で変動量の小さい微小変動(サイクリック)分(C)、数分~10分の短周期変動(フリンジ)分(D)、10数分以上の長周期変動(サステンド)分(A)に分けられる。周波数調整は、Cに対しては、システムの自己制御性(周波数が上がると負荷が増え、下がると減るなど)および、発電機の調速機による運転(ガバナーフリー運転)により、Bの部分はAFC(自動周波数制御)により、Aの部分は翌日の負荷予測に基づく前日からの経済負荷配分を含む時間帯別発電計画および当日指令に従って行われる。



P_N : 基準出力

n_N : 基準回転数

個々の水力発電機の出力は、流れ込み式小水力での上池水位一定運転、給電指令やAFC指令に基づく一定出力運転、周波数変動に追従するガバナーフリー運転(GF)などがあり、それぞれの目標が実現できるようにガイドベーン開度を調整することによって行う。

調速機運転の場合は、出力と回転数の関係は左図のように垂下特性(回転数(周波数)が下がると出力が増加する)とする。

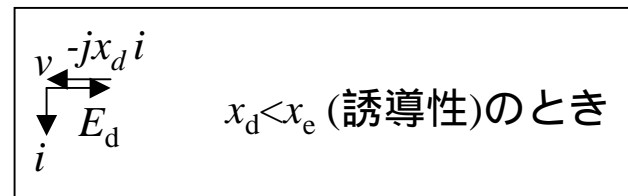
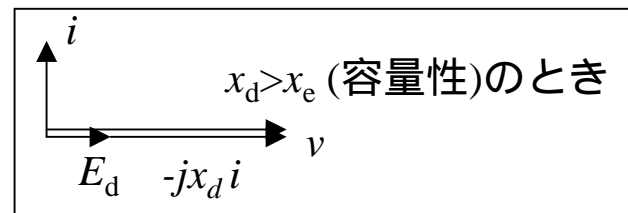
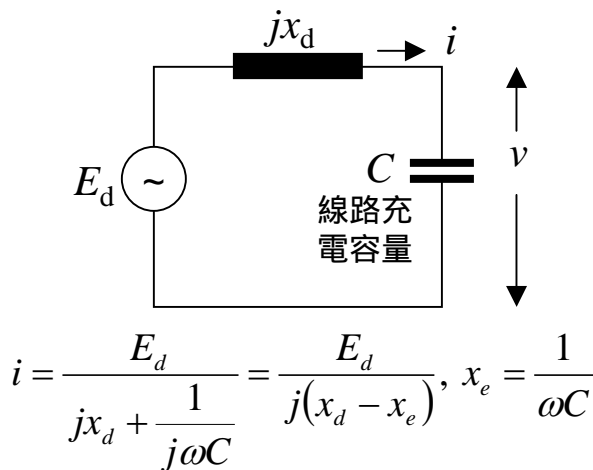
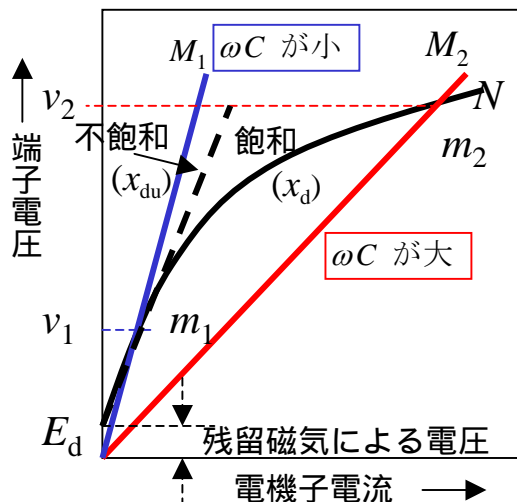
$$R = \frac{(n_2 - n_1)/n_N}{(P_1 - P_2)/P_N} \times 100[\%]$$

を速度調停率といい通常2~3%の値とする。

すなわち、出力変化100%での回転数変化(周波数変化)が2~3%である。

起動用電力を所内用水車で供給できるようにするなど自立可能な水力発電所は、大事故により分離した系統の復旧過程で、ガスタービン発電機などとともに試送電を行い系統復旧の拠点となることがある。

このような場合、無負荷の送電線の充電を行う際に問題となるのが自己励磁現象である。



グラフに示すように、励磁がなくても残留磁気により、内部誘起電圧ができる。このとき、電流が容量性になると自己励磁 ($x_d \times i$ に相当する電圧上昇) により端子電圧が上昇し定格電圧を超えることもある。

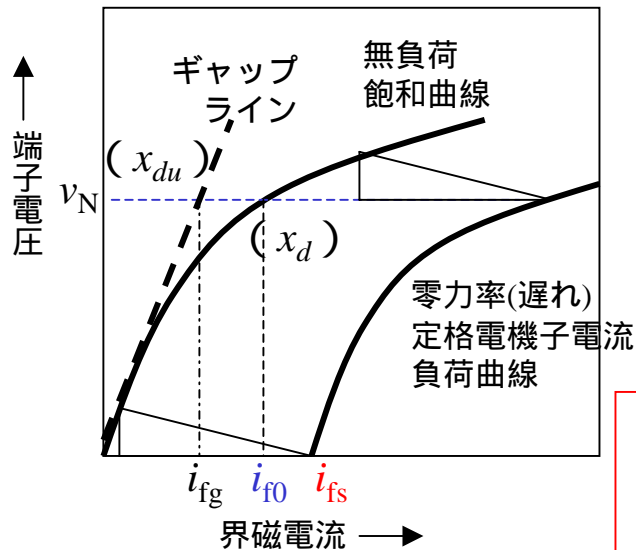
自己励磁を起こさないようにするためには、不飽和の直軸リアクタンス $x_{du} = (1 + \sigma)x_d$, (σ は発電機無負荷励磁曲線の飽和係数) として、 $x_{du} \leq x_e$ すなわち、 x_{du} と x_e の合成値が誘導性であることである。このとき、充電可能な容量 Q は、 $Q \leq \frac{v^2}{x_{du}} = \frac{v^2}{1 + \sigma} \times \text{短絡比}$ [pu] であるからこの

確認が必要である。(短絡比 = $1/x_d$)

確認が必要である。(短絡比 = $1/x_d$)

11. 試送電と自己励磁、短絡比 続き

$$\text{短絡比} = \frac{\text{定格速度で無負荷定格電圧を誘起するのに必要な界磁電流}}{\text{三相短絡時に定格電流に等しい持続短絡電流を流すのに必要な界磁電流}} = \frac{i_{f0}}{i_{fs}}$$



短絡比は飽和直軸同期リアクタンスの逆数に等しい。

すなわち、短絡比 $= \frac{1}{x_d} = \frac{1+\sigma}{x_{du}}$ である。

x_d の値は、水力発電などの突極機では 1.1~1.4[p.u.]
 汽力などの非突極機では、1.7~2.0[p.u.]程度である。

短絡比が大きいと

長所として

リアクタンスが小さい、すなわち、磁気回路の漏洩が少ない鉄機械(材料の鉄が多い機械)となる。

従って、電圧変動率が小さく、安定度向上に貢献する。

電機子反作用が小さく自己励磁が生じにくく充電可能容量が大きくなる。

一方、短所としては、

短絡比を大きく取ると、鉄心寸法を大きくし、界磁銅量を増して起磁力を大きくする。このため重量が増し、価格が高くなり、また基礎構造物の建設費も上がる。

12.水力発電所の環境対策

水力発電所の環境側面としては、時系列的には

建設段階 発電所建設段階の諸問題の予測・調査と解決策の実施

運用段階 運用開始後の諸問題の予測・調査と解決策の実施

があり、対象事項としては、

自然環境保全 魚類鳥類植物等生物保護、観光目的の河川流量維持

建設騒音の防止、魚道の設置など

水質保全 河川、貯水池富栄養化防止、濁水長期化防止

油による汚染防止のための軸受潤滑や操作機構のオイルレス化など
(油自蔵型、水軸受、電動サーボの採用など)

構造物の環境調和 美観確保、地下化、植樹

サージタンクの塗色など

社会安全確保 ダム放流時の安全確保、台風前の予備放流、洪水防止、

土砂流出防止など

等がある。

13.経年水力発電所更新における設備簡素化等最近の技術動向

既存の水力発電所における最新技術として次の四つの面に特徴がある。

- 1.維持管理技術におけるTBMからCBMへの移行
- 2.オイルレス化の進展
- 3.電動化の進展
- 4.デジタル化の進展

- 1.TBM(Time-based Maintenance 時間基準保全)からCBM(Condition-based Maintenance 状態基準保全)へ
「何年に1回」から「設備の状態(診断結果)に応じた」取替え・修繕などの維持管理を行うことにより設備保全の合理化、すなわち、コスト削減と同時に信頼度維持向上をはかるという方向に変わってきている。
最近における設備診断技術の進歩に負うところが極めて大きい。

2.オイルレス化の進展

油としては、潤滑油と操作油の2種類があるが、この両方について極力使用量を少なくする方向での技術革新が進んでいる。

油の問題点は、潤滑油装置の複雑さや漏油による環境汚染、機器等の汚れ、絶縁劣化、圧油ポンプや圧油タンクなどのスペースの大きなことや、高圧であるための安全管理の煩わしさなどがある。

潤滑油については、最近の技術進歩により、磨耗の少ないプラスチック系の軸受け新素材や非接触の磁気軸受のスラスト軸受け、ガイド軸受け、横軸ジャーナル軸受けへの適用、ラビリンスに代わるプラスチックブラシによる軸封により、潤滑油そのものの少量化や廃止、潤滑油の冷却に水の代わりに空気冷却にすることによる給水装置の省略などがある。

操作油に関しては、電動操作への転換が活発に行われている。

3.電動化

操作機構アクチュエータの動力媒体として従来は、圧油、圧縮空気が多用されてきたが、

- a. 圧油タンクやポンプの維持管理の簡素化やこれらのスペース節減、油漏れによる環境汚染の防止のため、近年の技術進歩で回転数や位置制御が容易になった電動機を使う方向になりつつある。
- b. 圧縮空気装置についても同様な考え方で電動機を使う電動サーボ化や電磁ブレーキの採用による圧縮空気装置の廃止ないし小型化が進んでいる。

電動化は入口弁操作や調速装置のアクチュエータで急速に進行している。

4.デジタル化の進展

対象は励磁装置、自動運転制御装置、調速装置のレギュレータ部分などである。

また、励磁装置ではブラシレス化が急速に進んでいる。

以上による設備の変化としては、省略ないし減少する設備として

給水装置

圧油装置

空気圧縮装置

潤滑油装置

制圧機

グリース給油装置

ブラシ

がある。

また、磨耗部分の補修技術として

「溶射ガス照射法」が開発された。

この項参考資料

1.美濃、本田、中沢

「水力発電所の設備とその維持管理の最新動向」

電学誌B,2008/8

2.中野

「環境保全、機器の長寿命化に貢献する水力発電所」

東芝レビュー58/7/2003

3.設備診断技術に関する各種資料