既設揚水発電所における 揚水・発電同時運転に関する水理検討

HYDRAULIC STUDY ON THE SIMULTANEOUS OPERATION AT AN EXISTING PUMPED-STORAGE HYDROELECTRIC PLANT

田岡洋¹・河内友一²・入江彰³・吉岡一郎⁴・佐藤隆宏⁵

Hiroshi TAOKA, Yuichi KOUCHI, Akira IRIE, Ichiro YOSHIOKA and Takahiro SATO

¹非会員 工修 中国電力株式会社流通事業本部（〒730-8701 広島市中区小町4番33号）

²正会員 博士（環境学）中国電力株式会社技術開発総合研究所（〒739-0046 広島県東広島市鏡山3-9-1）

³正会員 博士（工学）中国電力株式会社流通事業本部（〒680-0812 鳥取市新品治町1番地2）

⁴正会員 工修 中国電力株式会社流通事業本部（〒730-8701 広島市中区小町4番33号）

⁵正会員 工修 電力中央研究所地球工学研究所流体科学領域（〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646）

Generally, pumped-storage hydropower plants with constant speed type can change generating power in order to maintain the frequency of electricity grid, provided that turbine mode is selected. However, the existing pumped storage plant with this type can control the power evacuated to the grid even in the pumping mode just by adopting simultaneous operation. In the operation, some units are in turbine mode and others in pumping mode. In this paper, hydraulic problems, which were not considered in the design stage, in the simultaneous operation of the existing pumped storage hydropower plant, such as surging, water hammer pressure and head loss at the branch are examined. It is confirmed that these problems wouldn't affect the possibility of the simultaneous operation.

Key Words : *pumped-storage hydroelectric plant, frequency control, surging, water hammer pressure, head loss*

1. はじめに

電力の品質は、一般的には、停電せず継続供給することができる度合い、電圧を規定値どおり維持できる度合い、周波数を規定値どおり維持できる度合いという3つの指標をもって説明される¹⁾。停電が日常生活に大きな影響を与えるのは周知のことであるが、電圧の変化が大きいとモーターを使用した機器の故障や冷蔵庫などインバーターを使用した機器の発熱などが発生する。周波数が変化すると工場のモーターの回転速度が変わるなどして、工業製品の品質のばらつきなどの影響が生じ、その程度が大きくなると発電所にも影響が出て停電が発生する可能性もある。電力の需要は常に変化していることから、品質を安価に確保するために設備や運用の面で様々な工夫がなされているが、そのうちのひとつとして大きな役割を担っているのが、大型の揚水発電所である。

揚水発電所の主たる役割²⁾は、需給均衡の維持、発電費用を抑える経済運用への貢献などである。特に後者に

おいては、揚水を行うケースとして、火力が経済運用するため完全に停止しない最低出力で運用しても供給力が需要を上回る場合（下げ代対策）や、深夜や休日などに安価な電源で揚水すれば効果がある場合などがあるほか、発電の目的によっては周波数調整用、系統運用対策などのために稼動することもある。

揚水発電所の型式は、発電用の水車・発電機と揚水用のポンプ・電動機を別々に設置する「別置式」、発電用水車、揚水用ポンプ、発電電動機を設置する「タンデム式」、水車とポンプの機能をあわせ持ったポンプ水車と発電電動機を設置する「ポンプ水車式」の3種類に分類される。我が国で最初の揚水発電所として1934年に運転を開始した小口川第三発電所（別置式）と池尻川発電所（一部タンデム式）は、豊水期に水を汲み上げ渇水期に発電をするものであった。その後、1960年頃以降電源構成の変化、昼間に生じる1日の需要変動におけるピークに対応する電源の必要性などから、現在の揚水発電所の大半を占める大型のポンプ水車式のものが開発されるようになった³⁾。1980年頃より夜間でも需給バランスの微妙

な調整の必要性が生じてきたことから、揚水時にも周波数を調整する機能が求められるようになった。それまでの国内の一般的な揚水発電所のポンプ水車・発電電動機は定速機であり、発電時には周波数調整が可能であるが、揚水運転中には周波数を調整する能力はなかった。これを解決するものとして、揚水時の入力電力を調整できるポンプ水車式可変速揚水発電システムが開発され、大河内発電所において採用された⁴⁾。最近では、奥多々良木発電所⁵⁾のように、既存の定速機の揚水発電所を可変速システムへ変更する例もみられるようになったが、この場合は発電機周辺に励磁装置等の設置スペースが新たに必要になるなど、多額の工事費が必要である。

欧州では、オーストリアのKOPS 発電所のようにタンデム式の揚水発電所において揚水と発電を同時に行なうこと（以下、「揚水・発電同時運転」）により、揚水時における周波数調整を実施している発電所の例も見られるようになった⁶⁾。同様な同時運転を既設の定速機のポンプ水車式揚水発電所において実施することができれば、大きな費用を投じて可変速システムへ更新することなく可変速システムと類似した機能を確保することができる。しかしながら、そのような実施例や検討はなく、既存水路設備における水理的な課題も明らかになっていない。

そこで、本稿では、揚水・発電同時運転を想定せずに設計・開発された複数台のポンプ水車（定速機）を持つ揚水式発電所において、揚水運転中に少なくとも1台を自動周波数調整発電（以下、「AFC運転」）で同時運転し、周波数調整機能を持たせた場合の水路内の水理的な課題について検討した結果を報告する。

2. 対象とした揚水発電所

本検討で対象とした揚水発電所は、上池と下池の間を約6kmの水路系で結ばれ、有効落差489m、最大使用水量300m³/s、最大出力120万kWである。対象とした揚水発電所の諸元を表-1に、概要図を図-1に示す。上池取水口からサージタンクまでは約3.4kmの導水路トンネルで結ばれており、サージタンクのすぐ下流にY分岐部がある。Y分岐後に約1kmの水圧鉄管を経て再度分岐し4台の水車へ導水される。水車と下池は2本の放水路により結ばれており、それぞれの放水路の途中に調圧水室を有している。現状では、この発電所においては発電時のみ周波数調整のためのAFC運転を行っている。

3. 同時運転の概要と水理的検討の内容

揚水・発電同時運転を実施した場合の水路内の流れの状況を図-1にあわせて示す。図-1に示した流れ状況は1,2号機において揚水運転を、3,4号機において発電運転

を実施した場合のものである。このような同時運転による周波数調整の方法は図-2に示すとおりであり、定速機による揚水と同時に、発電側でAFC運転を行い、その入出力の差分により、結果的に揚水時においてAFC運転を行うものである。

図-1に示すような水路内流れの状況、とくにY分岐部の流れの方向は建設時の設計では考慮されていない。そこで、同時運転の実施可否を判断するための水理的な検討課題として表-2に示す8項目を取り上げた。今回の検討は可能性検討の段階であるため、表-2の8項目のうち、最も基本的な課題である ～ の3項目について検討することとし、～ の5項目については今後の課題とした。また、同時運転の組み合わせとしては、1号機揚水、2号機発電のように水車周辺の短区間の水路範囲内での運転もありうるが、本研究では最も実現可能性が高い1,2号揚水、3,4号発電といったY分岐部を含ん

表-1 検討対象とした揚水発電所諸元

運転開始	1996年（平成8年）
最大出力	120万kW（30万kW×4台）
最大使用水量	300m ³ /s（75m ³ /s×4台）
最大揚水量	220m ³ /s（55m ³ /s×4台）
有効落差	489m
導水路	円形圧力式、1条、3,355m
サージタンク	制水口型、1基
水圧鉄管	本管：2条、条管：4条
放水路	円形圧力式、2条、1,052m
調圧水室（放水路サージタンク）	制水口型、2基
水車型式	縦軸ワッサン型ポンプ水車

図-1 検討対象とした揚水発電所概要図と同時運転時の流れ

発電(AFC)と揚水同時運転時の発電所入出力

図-2 揚水・発電同時運転による周波数調整の概要図

表-2 同時運転を実施するうえでの水理的課題

水理的課題	内 容
サージング	発電機急停止時のサージ タンク水位
水撃圧	発電機急停止時の水撃圧
損失水頭	分岐部の損失水頭
キャピテーション	分岐部のキャピテーション
流体力	分岐部に作用する流体力
流れのはく離による振動	分岐部のはく離による振動
起動時の流れの変化	運転開始時の水路内の流れの変化の追従性
水路系全体の自励振動	同時運転時の水路の流れの不安定性の検討

だ長区間の水路範囲の組み合わせに絞って検討することとした．以下に ～ の3項目の検討結果を示す．

4．サージングに関する検討

図-1に示したような同時運転を実施しているときに発電急停止（負荷遮断）・揚水急停止（入力遮断）が発生した場合のサージタンクの最高・最低水位について検討した．鶴巻らはAFC運転時の水力発電所におけるサージング水位変動特性の理論解を明らかにしているが⁷⁾，その研究で前提としている運転方法は通常の発電運転であり，本研究のような同時運転は対象としていない．そこで，式(1a)～(1g)に示す制水口型のサージングの基礎式を用いた逐次計算により同時運転時におけるサージタンク内の水位変動量を評価した．

・取水口～制水立坑

$$\frac{dH_1}{dt} = \frac{A_1 \cdot V_1 - A_2 \cdot V_2}{F_1} \quad (1a)$$

$$\frac{dV_1}{dt} = \frac{H_0 - H_1 - C_1 \cdot V_1 \cdot |V_1|}{L_1/g} \quad (1b)$$

・制水立坑～サージタンク

$$\frac{dH_2}{dt} = \frac{A_2 \cdot V_2 - Q_{sum}}{F_2} \quad (1c)$$

$$\frac{dV_2}{dt} = \frac{H_1 - H_2 - C_2 \cdot V_2 \cdot |V_2| - k_2}{L_2/g} \quad (1d)$$

$$k_2 = \frac{(A_2 \cdot V_2 - Q_{sum}) |A_2 \cdot V_2 - Q_{sum}|}{2g(C_d \cdot F_p)^2} \quad (1e)$$

$$C_d = \begin{cases} C_{din} & (A_2 \cdot V_2 - Q_{sum}) \geq 0 \\ C_{dout} & (A_2 \cdot V_2 - Q_{sum}) < 0 \end{cases} \quad (1f)$$

$$Q_{sum} = Q_{P1} + Q_{P2} + Q_{P3} + Q_{P4} \quad (1g)$$

ここに， H_0, H_1, H_2 ：上池，制水立坑，サージタンクの水位， F_1, F_2 ：制水立坑，サージタンクの断面積， V_1, V_2 ：取水口から制水立坑間の導水路流速，制水立坑か

らサージタンク間の導水路流速， C_1, C_2 ：取水口から制水立坑間の損失水頭係数，制水立坑からサージタンク間の損失水頭係数， A_1, A_2 ：取水口から制水立坑間の導水路断面積，制水立坑からサージタンク間の導水路断面積， L_1, L_2 ：取水口から制水立坑間の導水路延長，制水立坑からサージタンク間の導水路延長， C_{din}, C_{dout} ：導水路サージタンクの流入・流出時の制水口係数， F_p ：制水口断面積， $Q_{P1} \sim Q_{P4}$ ， Q_{sum} ：1～4号機の流量，導水路内流量（発電方向を正，揚水方向を負）である．なお，使用した計算プログラムは運転開始時の試験における実測結果を用いて，その水位およびサージング波形の再現性が良好であることを確認している．本検討では前述したように1,2号揚水，3,4号発電の組み合わせの同時運転を対象としているため，水車より下流の放水路については水の流れは設計どおりである．このため，サージングの検討は水車よりも上流側を対象とした．

AFC運転時の発電流量は，常に変化する電力需給に応じて変化するため，サージタンク水位の変動が最大となる流量波形，周期をトライアルで決定した．また，危険側を想定するため，2台最大揚水（110m³/s）と2台AFC運転（150 m³/s～60m³/s）の同時運転を検討条件としている．このときの同時運転時の流量変動波形およびサージタンク水位の経時変化を図-3，図-4に示す．このようにサージタンク内の水位が変動をしているときに負荷遮断，入力遮断した場合の最高水位・最低水位を検討した．

最高水位を検討するための遮断パターンとして，水位上昇量が大きいとされる負荷遮断の場合および入力遮断によるサージング揺れ戻しが負荷遮断により増幅される場合として，同時運転中に2台負荷遮断（揚水は継

図-3 2台揚水，2台発電（AFC運転）中の導水路内流量

図-4 2台揚水，2台発電（AFC運転）中の導水路サージタンク水位変動

続)と 同時運転中に2台入力遮断し一定時間後に2台
 負荷遮断という2ケースを選定した。各ケースの遮断時
 刻はそれぞれ最高水位になる時刻をトライアルで決定し
 た。このときのサージタンク内の水位変動の計算結果を
 図-5に示す。最高水位はパターン で発生し、その水位
 はサージタンク天端よりも3m程度低い高さであった。
 最低水位を検討するための遮断パターンとしては 同時
 運転中に2台入力遮断(発電は継続)と 同時運転中に2
 台入力遮断し一定時間後に2台負荷遮断という2ケースを
 選定し、最高水位の検討と同様に遮断時刻はトライアル
 で決定した。このときのサージタンク内の水位変動の計
 算結果を図-6に示す。最低水位はパターン で発生し、
 その水位はサージタンク基盤よりも3m程度高い値で
 あった。

以上の検討により、比較的大きい流量変動条件におい
 ても、同時運転時の負荷・入力遮断によるサージタンク
 水位は既設サージタンク内に収納されることがあきらか
 となった。なお、設定する余裕を大きくしたい場合には、
 上池貯水池の水位に応じてAFC運転を実施しないなどの
 水位制限の措置をとればよい。

図-5 同時運転中に遮断した場合の最高水位の検討結果

図-6 同時運転中に遮断した場合の最低水位の検討結果

5. 水撃圧に関する検討

水力発電所では、負荷遮断や入力遮断などの使用水量
 の増減に応じて、導水路内で水撃圧が発生する。このた
 め、同時運転時における水撃圧をあらかじめ評価してお
 く必要がある。一般水力発電所では、例えばAllieviの式⁸⁾
 などにより水撃圧を評価することが多いが、この揚水
 発電所の水車はポンプ水車であるため、遮断時に水車が
 複雑な挙動をすることから、その手法を用いることがで
 きない。ポンプ水車では、負荷遮断時にはまず水車回転
 数が上昇し無拘束速度に至ると回転速度が安定し、その
 後、流量が逆転し揚水状態になる。一方、ポンプ入力遮
 断時には、急速に揚水流量が低下し、その後発電方向に
 逆流する。このような複雑な挙動を予測するため、遮断
 時のポンプ水車の動きを境界条件に入れた特性曲線法に
 より水撃圧を検討した。水撃圧の評価に使用した基礎式
 は式(2a),(2b)に示すとおりである。具体的な計算方法は
 参考文献⁹⁾による。

$$\left. \begin{aligned} \frac{a}{g} \frac{dH}{dt} + \frac{dV}{dt} + \frac{g}{a} V \sin \alpha + \frac{fV|V|}{2D} &= 0 \\ \frac{dx}{dt} &= V + a \end{aligned} \right\} C^+ \quad (2a)$$

$$\left. \begin{aligned} -\frac{a}{g} \frac{dH}{dt} + \frac{dV}{dt} - \frac{g}{a} V \sin \alpha + \frac{fV|V|}{2D} &= 0 \\ \frac{dx}{dt} &= V - a \end{aligned} \right\} C^- \quad (2b)$$

ここに、 H ：水撃水頭(位置水頭+圧力水頭)、 V ：
 流速、 a ：水撃圧の伝播速度、 f ：摩擦損失係数、 D ：管
 径、 g ：重力加速度である。水車の回転数は式(3)と水車
 特性曲線から計算する。

$$\frac{2\pi}{60} \frac{GD^2}{4g} \frac{dN}{dt} = T \quad (3)$$

ここに、 GD^2 ：はずみ車効果、 T ：水車トルク、 N ：水
 車回転数である。ガイドベーン開度、水車上下流圧力、
 回転数、トルクから特性曲線法を用いて水撃圧を算出す
 る。計算に必要なポンプ水車の特性は建設時の水車模型
 実験により得られたものを用いた。

水撃圧の計算には水車の上下流の水圧が必要であるた
 め、上池から下池までのサージタンク、調圧水槽を含む
 全水路を管路網として構成した。

AFC運転ではない通常発電時($Q=300\text{m}^3/\text{s}$ で一定)の
 ときに発電停止した場合の水撃圧を計算すると図-7のと
 おりであり、水車位置での最大水頭は713mであった。

次に、同時運転時の水撃圧を計算した。同時運転時の
 水撃圧の遮断条件はAFC運転中にサージングで最高水位
 が生じる条件である2台発電停止(揚水は継続)とし、
 停止時刻は前述のサージング検討でサージタンク内の最

図-7 通常運転時の水撃圧（水車位置水頭）

図-8 同時運転時の水撃圧（水車位置水頭）
（上段：全時系列，下段：遮断時付近拡大）

高水位が最大となるようにトライアル検討した結果である1215secとした。このときの水車位置の水頭の時系列を図-8に示す。同時運転のときの水車位置の最大水頭は733mであった。

AFC運転中の負荷遮断側の水撃圧波形形状は通常運転時の波形と類似しているが、最大値は通常運転時の値よりも20m大きい。これは、同時運転時は取水口～Y分岐部までの導水路の流量が $-50 \sim 40 \text{ m}^3/\text{s}$ と通常運転時の $300 \text{ m}^3/\text{s}$ よりもかなり小さいことから、この区間の損失水頭が小さく、結果的に静水圧が通常運転時を上回るためである。ただし、同時運転と通常運転の差はそれほど大きい値ではなく、同時運転時に上池に制限水位を設定することにより対応が可能と考えられる。また図-8から、揚水側の水撃圧の変化は小さく、発電側（3,4号機）の遮断が揚水側（1,2号機）に与える影響は小さいことがわかる。

6．損失水頭に関する検討

図-1に示すとおりこの発電所では導水路サージタンクの下流にY分岐部があるが、同時運転を実施した場合にはこれまでの設計では考慮していない方向の流れがY分岐部に生じ損失水頭が過大になることが懸念される。

そこで、この同時運転時におけるY分岐部の損失水頭を3次元流体解析により評価した。なお、前述したように本検討では1,2号揚水、3,4号発電という運転方法を対象としたため、損失水頭の検討においては導水路サージタンク直下のY分岐部のみを対象とした。数値解析には、非構造格子系の3次元熱流体解析ソフトウェアSCRYU/Tetra (V8)を使用した。上流側のトンネル湾曲およびY分岐後の鉄管の曲がりを考慮するために、解析範囲はY分岐部より取水口側280mから分岐後下流390mまでとした。解析モデルの全体図を図-9に示すとおりである。なお、解析モデルでは分岐部の整流板や分岐部下流の鉄管弁などを忠実に再現した。解析用の平均的な格子幅は、水路全体は約16cm、Y分岐部は約8cmとした。Y分岐部の平均的な格子幅は下流側鉄管直径5mの約1/60であり、十分な分解能を有している。なお、計算格子数は約6500万である。損失水頭を評価するための解析ケースとして、揚水量は2台揚水時の最大流量（ $-110 \text{ m}^3/\text{s}$ ）で一定としAFC運転をする発電側の流量を $25 \sim 150 \text{ m}^3/\text{s}$ まで変化した表-3のケースを設定した。解析は定常解析とし、乱流モデルは標準k-モデルを用いた。

解析結果から、発電側流量 $100 \text{ m}^3/\text{s}$ の場合のY分岐部（水路底から1m位置）のベクトル図を図-10に示す。分岐部の整流板下流で剥離が生じていることがわかる。解析結果からY分岐部の損失水頭を以下のように評価した。図-11に示す面A,B,C面における断面平均圧力、断面平均流速から各断面の全水頭を算出し、最大発電時（H300）はA面を、最大揚水時（Y220）はB,C面を、同時運転の場合はB面を基準とした場合の全水頭の低下量

図-9 損失水頭を評価するための解析モデル

表-3 損失水頭を評価するための解析ケース

運転	ケース	揚水側流量	発電側流量	Y分岐部流況
同時 運転	Y110H150	$110 \text{ m}^3/\text{s}$	$150 \text{ m}^3/\text{s}$	合流
	Y110H100	$110 \text{ m}^3/\text{s}$	$100 \text{ m}^3/\text{s}$	分岐
	Y110H75	$110 \text{ m}^3/\text{s}$	$75 \text{ m}^3/\text{s}$	分岐
	Y110H50	$110 \text{ m}^3/\text{s}$	$50 \text{ m}^3/\text{s}$	分岐
	Y110H25	$110 \text{ m}^3/\text{s}$	$25 \text{ m}^3/\text{s}$	分岐

を損失水頭として評価した．このため，得られる損失水頭は各面間の摩擦，曲がり損失等を含めた値になる．分岐ケースの損失水頭はB-C間で最大1.0m程度，B-A間で最大0.5m程度であった．また，合流ケース(Y110H150)の損失水頭は最大1.0m程度であった．通常運転時の損失水頭設計値が約34mであり同時運転分岐部の損失水頭はその3%程度にすぎないことから，同時運転のY分岐部の損失水頭は運転上支障がない程度の大きさであるといえる．

分岐ケースの損失水頭から損失係数を求めた結果を図-12に示す．あわせて，比較のためにGardelの式¹⁰⁾による損失係数を図-12に示す．分岐ケースの解析による同時運転時の損失係数の値はGardelの式と同程度であった．同時運転時のサージングや水撃圧の詳細検討で行う1次元解析に分岐損失を考慮する場合にはこの損失係数を用いることができる．

図-10 同時運転時（ケースY110H100）のY分岐部ベクトル図

図-11 損失水頭を評価するための断面位置

図-12 解析とGardelの式による分岐部損失水頭

7. おわりに

本研究では，複数台の定速機のポンプ水車および水路途中にY分岐部を有する既設の揚水発電所において同時運転を実施した場合の水理的課題について8項目を抽出し，そのうち基本的な3つの検討を行い以下の結論を得た．

- (1) 同時運転によるAFC運転を実施した場合の流量変動条件においても，負荷・入力遮断によるサージタンク水位は既設のサージタンク内に収納される．
- (2) 同時運転中の負荷遮断側の水撃圧波形は通常運転時の波形と類似しているが，最大値は通常運転時の値よりも20m大きい．これは導水路における損失水頭が小さく，結果的に静水圧が通常運転時を上回るためである．ただし，その差は同時運転時に上池に制限水位を設定することにより対応が可能な程度の値である．
- (3) 同時運転時におけるY分岐部の損失水頭は総損失水頭の3%程度であり，運転上支障がない程度の大きさと考えられる．
- (4) 水理的な基本検討における解決が困難な課題はなく，同種の既設揚水発電所における揚水・発電同時運転の可能性が見出された．

参考文献

- 1) 例えば，電気事業連合会編纂：電力系統，電気事業講座 7 pp.27-37,株式会社エネルギーフォーラム, 2007.2.
- 2) 例えば，電気事業連合会編纂：電力系統，電気事業講座 7, pp.193-194, 株式会社エネルギーフォーラム, 2007.2.
- 3) 例えば，エレクトリックエナジー史，pp.135-138，オーム社, 1989.12.
- 4) 大河内発電所運開，電力土木，No259, pp200-201,1995.9.
- 5) 西中廣志，米津和哉，丹原秀大：奥多々良木発電所 可変速化に伴う横坑拡幅工事の概要，電力土木，No.354, pp.25-29, 2011.7.
- 6) 吉岡一郎：ヨーロッパにおける再生可能エネルギーおよび放射性廃棄物処理に関する調査 -第33回電力土木技術海外調査事業報告，電力土木，No.352, pp.141-146,2011.3.
- 7) 鶴巻有一郎，板倉正和：自動周波数制御用水力発電所におけるサージングの研究,土木学会論文集No.509/ -30,pp.111-119 , 1995.2.
- 8) 例えば社団法人土木学会編：水理公式集 [平成11年度版] ,p279,1999.11.
- 9) 社団法人電気協同研究会：水車・発電機の水圧変動率及び速度変動率,第40巻,第2号,pp.42-45,1984.7.
- 10)例えば社団法人土木学会，水理公式集昭和38年増補改訂版，pp.153-157, 1967.

(2012.9.30受付)