

参 考 資 料

土木學會誌 第十六卷第七號 昭和五年七月

揚水發電所 (Pumped Storage Hydroelectric Plants)

本編は Proceedings of the American Society of Civil Engineers, November, 1928. 所載 W. K. Freeman 氏の Pumped Storage Hydroelectric Plants より抄譯せるものなり。

概 論

負荷の軽い時に電力を用ひポンプを運轉して貯水池に水を揚げ置き、尖頭負荷時にこの水を用ひ電力を得んとする所の水力發電所が米國に於ても近來相當注目されて來た。併し揚水發電所は半世紀前既に建設されたものがある。現在では世界中で 42 箇所あるが、其の中の 22 は最近 5 箇年間に造られたもので 34 000 馬力のポンプを備へたものもあり、計畫中のものには全揚水能力 250 000 キロワットに及ぶものがある。猶歐洲では 10 箇所の發電所が計畫中で米國でも最近 Rocky 河に於て Connecticut 電燈電力會社に依り最初の揚水發電所が完成され、計畫中のものは 36 あつて、90 尺の落差に對し 5 000 個の水を揚水しやうと言ふ計畫もある。揚水發電所を hydraulic accumulator と呼ぶ人もあるが著者は pumped storage hydroelectric plant と呼ぶ方がよいと想ふ。

揚水發電所の原理

揚水發電所では貯水池として適當な地點があり、且其の貯水池に河が流入しなくともポンプを用ひて容易に水を揚げ得る様な低い水源が貯水池の近所にあればよい。而して火力又は水力發電所の負荷の軽い時の廉い電力を以てポンプを運轉し、貯水池に水を揚げて貯へ置き此の水を用ひて尖頭負荷時に高價な電力を得んとするのである。即ち此の方法では需要者が要求する時に發電する事を得るのである。元來負荷の軽い時火力發電所の發電機は停止するか、又は一部分しか運轉してゐないのでこれを揚水に用ふれば、其の料金は大變廉い。又水力發電所では負荷の軽い時不用の水は利用する事なく流してしまふ。故にこの水の發生する電力代は無料と見てよい。即ち停止さるべき併し資本のかゝつて居る設備を利用し揚水をなし、蓄電池の様に必要な時迄貯へ置き發電するのであるから經濟的に引合ふのである。

揚水發電所の形式

揚水發電所には三種の形式がある、即ち貯水式 (Storage type)、調整式 (Pondage type) 及 (Part head type) である。

1. 貯水式 (Storage type)

Rocky 河発電所は貯水式で二つの運轉方法が用ひられてゐる。その一つは貯水池から放出された水は尖頭負荷時に於てこの発電所のみならず電力を發生し其の日又は其の週の内て負荷の輕くなつた時間量の水が池に補充され、貯水池は空虛になる事なく、調整池又は短時間の貯水池式として働くのである。他は河川流量調整 flow regulation をするので池から放出された水は本川の流量を増加しこの発電所のみならず下流発電所を利する。この方法は普通の貯水池と同様であるが唯自然流量が小さいから貯水池にポンプを以て揚水する點のみが異なるのである。

2. 調整式 (Pondage type)

この形式のものは短時間の調整のみをやる。貯水式の様には下流の河川の流量を調整する事はやらない。Hengstey 発電所の様には 34 000 馬力のポンプを備へた巨大なものもあるが鐵筋コンクリート造の小さいものもある。この式の発電所の中には水槽と放水路に貯水池を有するものがある。此の時には下の貯水池を満水すれば、漏水と蒸發に對し水を補充すればよいから、自然流量が餘り必要でなく、高低二つの適當な貯水池があればよい。従つて今迄考へられなかつた地點にも発電所を造り得る事がある。

3. Part head type (発電所落差の一部分のみ水を揚ぐる式)

Part head type は或る高さだけ水を揚げ、より高き落差を利用し發電し得るのである。普通は湖水又は他の水源から水を水壓鐵管に入れて貯水池に揚げるのである。

經濟的考察

三つの形式が如何なる場合經濟的なるかを一般的に述べる事は躊躇せらるゝ。併し普通の水力発電所が引合へば揚水発電所も引合ふであらう。但し揚水発電所は揚水設備及運轉費を要する短所があるが、又普通の水力発電所に勝る色々の利點もある。

- (1) 雨量や流域に無關係である。勿論之等が多ければ揚水も少くてすむ。
- (2) 本川でなく支川に発電所があるから一定の貯水容量に對し土地其の他の費用が廉い。
- (3) 貯水容量に比し流域が小さく洪水に對する施設が小さくてよい。
- (4) 大きな河川又は池から揚水する場合急に負荷のかゝつた場合放出した貯水池の水は揚水により補充し得るから豫備発電所になし得る。
- (5) 最大なる利點は僅かなる揚水設備費を以て常時又は豫備出力を増加し得る事である。著者は米國に於ける既設水力発電所で揚水式に成し得るものが可成りあると思ふ。

既設発電所一覽表 (Table 1)

以上の data よりの摘要

始めて揚水発電所の建設せられし年 1882 年 Zurich

最大有効貯水量	6 000 000 000 立方呎 将来 7 000 000 000 立方呎 Rocky River
最小貯水量	200 000 立方呎 Tübingen, Brunnemühle and Zweribach
最大落差	2 900 呎 Tremorgio
最低落差	80 呎 Cornabbia
最大揚水ポンプ	34 000 馬力 Hengstey
最大揚水能力	毎秒 480 立方呎 Hemfuth
ポンプの最大能率	87% Rocky River
最大の水車	45 000 馬力 Hengstey

計画中の発電所

計画中の最大発電所は獨逸 Our 河の 600 000 キロワットの発電所である (Table 2 参照)。

附 録

揚水発電所運轉の方法

Rocky 河発電所の様な storage type の発電所の發電には次の六つの方法が行はれる。但しこの場合平均月流量を考へ、一月の内に於ける流量の變化は考へ入れてない。

1. 調整 (Pondage)

春の洪水期の終り、貯水池が一杯の時から揚水発電所は後に示す (3) 及 (6) の場合を除き普通は用ひられぬ。火力と水力発電所とを有する時には水力発電所によりて最大の出力を得る様に發電される。若し揚水発電所のある本川の月平均流量が一定量以下に下れば水力発電所系の出力を減らさぬ爲に揚水発電所を運轉する。一日の尖頭負荷時に池から放出された水は日曜又は夜分の負荷の軽い時に火力発電所の電力に依つて補充する。貯水池は空虚になる事なく又河の流量にも影響する事がない。

2. 河川流量調整 (Flow Regulation)

若し川の流量がもつと減すれば貯水池から放出せる水は揚水発電所のみならず本川の流量を増加し下流発電所の出力を増す。

3. 自然流入水に依る電力

渾水が濟んで河の流量が増せば pondage 及 flow regulation の必要が無くなる。更に流量が増し揚水をしても下流の発電所の出力を減する憂が無くなれば水を池に送り、池を一杯にする。然る後は自然流入水は發電に用ひられ、貯水池の溢れる事が無い様にする。以上の順序を表にすれば次の様になる。

(一) 本川流量の減少しつゝある時

(a) 貯水池満水

(b) 満水せる貯水池に流入する水による電力

(c) 貯水池は満水のまま調整作用をする。

(d) 調整と流量調整作用により貯水池の水の減少が次第に速くなる。

(二) 本川流量が増しつゝある時

(d)(つゞき) 流量調整及調整作用による貯水池の水の減少が次第に少くなる。

(e) 池の水面が下つたまま調整作用のみを行ふ。

(f) 池は空虚のままにて揚水発電所は運転を休止する。

(g) 貯水池を揚水により満し始む。

(h) 池は元の如く一杯になる。

此のサイクルに従つて運転するのであるが、或る場合には (4), (5), (6) に示す様な方法も行はれる。

4. 過剰水力に依る電力

前記基礎のサイクルの (b) の状態即ち池は満水で水力発電所では夜分と日曜日には水を捨て、る場合には尖頭負荷時に池の水を用ひて発電し荷の軽い時過剰水力電氣を以て水を池に揚げ、火力発電所の石炭を節約する事が出来る。

5. 高價な火力に代る電力

基礎サイクル (b) の状態にある時僅かの時間だけ大きな負荷がかゝるとしても火力発電所では更にタービンを1臺運転せねばならぬ事がある。この時には電力料が大變高くつく故に揚水発電所を運転すれば經濟になる事がある。今前記の場合尖頭負荷時の火力が発電所渡し 8 ミルで (1 ミルは 1/10 セント) で荷の軽い時 4 ミルであるとする。水力発電所は出来るだけ水を引用し火力発電所でもタービンが全負荷で運転してゐる時には僅かの時間の負荷の増加に對しても揚水発電所を運転するか蒸氣タービンを更に1臺動かさねばならぬ。今同一變電所に於ける兩方の電力を比較してみる。

火力に依る發電費は次の如くして求められる。

能率	火力発電所變壓器	98%
	需要地迄の短かい送電線	95%
	合成能率	93%

故に火力発電所で 8 ミル/キロワット時なら變電所で 8.6 ミル/キロワット時になる。之を揚水発電所の發電費と比較する。

能率	火力発電所昇壓變壓器	98%
	揚水発電所迄の比較的長い送電線	90%
	水力発電所降壓變壓器	98%
	揚水モーター	96%
	揚水ポンプ	97%
	貯水池までの水壓鐵管	99%

貯水池からの水圧鐵管	98%
水車	89%
發電機	96%
水力發電所昇壓變壓器	98%
需要地迄の比較的短かい送電線	95%
合成能率	56%

故に火力發電所に於ける負荷の軽い時の發電費が4ミル/キロワット時ならば變電所で7.2ミル/キロワット時になり、上記の様な場合には火力の代りに揚水發電所を用ふる方が1.4ミル/キロワット時即ち16%の節約になる。

6. Break down power (出力の減少)

水力發電所に於ては危急の場合に際し運轉してゐない發電機も僅かの時間の中に運轉を始められる。併し放水路が池である場合の揚水發電所は用ひた水は後に上の貯水池に揚げられ、本川の流量に支配されぬ點が、一旦水を用ふれば早や戻らぬ他の水力發電所と異なる。揚水發電所が一定の豫備出力ある發電所たる爲には放水路に大きな河川又は池があつて基礎サイクル以外の運轉に對する發電及揚水設備をも有せねばならぬ。もし放水路に貯水池がなく揚水は本川の流水のみに依る場合は貯水池が満水の時以外或時間に於ける二次電力の發生は次の漏水時前の貯水池への揚水作業に支障を及ぼし水力發電所系の出力を減らす恐れがある。

Table I. List of Plants

Date of Construction	Location	Types	Static Head in feet		Reservoir elevation in feet	Present Net Reservoir Capacity in Billion cubic feet		Present Pumps				Horse-Power Capacity of Present Turbines		Reservoir with or without natural inflow	
			Power	Pumping		Head water	Tail water	Largest		Total		Largest	Total		
								Horse-power	Cubic feet per second	Horse-power	Cubic feet per second				
1882	Zurich (hydro mechanical until 1891)	Pondage	510	510		0.0006		400		700					
1885	American hydro-mechanical	"						100		100					without
1894	Luino, Switzerland	"													
1899	Choindez, "		1 970	1 970											
"	Clus, "		1 030	1 030											
1903	Ruppoldingen, "														
1904	Otlen-Aarburg, "	Pondage	1 030	1 030		0.0004		800		800					without
1908	Brunnenmühle, Germany	"	330	330		0.0002		160		240					without
1909	Schaffhausen, Switzerland	"	530	530		0.003		1 000		2 000					without
"	Clenezzo, Italy	"	1 410	1 410				785		1 570					without
"	S.E. d'Evian-Thonon-Annamasse	"	1 310	1 310		0.0004		600		600					without
1910	Chevenoz, France	"	1 310	1 310		0.0003		800		800					without
"	Stara di Viu, Italy	"	500	500		0.002	0.002	4 000		4 000		4 000			without
"	Cornabbia, "	"	80	80				5 800		5 800					without
1913	Viverone, "	"	490	490		0.01		4 500		9 750					with
"	Neckartzlingen, Germany	"	410	410		0.006		320		540					without
"	Mill Creek No. 2, U.S.A.	Part head	1 030	140		0.0003		100	4	100	4	1 330	2 600		with
1915	Lake Fully, Valais, Switzerland	"	5 410	460	6 990	0.10		570	7	570	7	3 000	12 000		with
1920	Fridingen, Germany	Pondage	570			0.001		620	7	1 860	21	750	2 250		
"	Fully, Switzerland	"	490	490				300		630					
1922	Tubingen, Germany	"	370	370		0.0002		190	3		4	290	290		without
1923	Überlingen, "	Storage	360	360		0.05		580	11	580	11	630	800		with
"	Schwarzenbach, "	Part head	1 220	730		0.5		10 000	110	20 000	220	27 500	55 000		with
"	Munster, France	Pondage	1 310	1 310		0.0006	0.0305	1 800	9	3 190		2 100	2 100		without
"	Ill Lake, Switzerland	Part head	3 230	360	7 630			500	8	1 500	24				with
1924	Lake Girotte, France	Storage	1 620	1 620	5 650	1.00		4 500	16	9 000	32				with
1925	Reutlingen, Germany	Pondage	390	390		0.0014	0.0028		23		35	2 000			
"	Waeggital, Switzerland	Storage	800	800	2 950	5		5 000	45	20 000	180	19 000	76 000		with
"	Zweribach, Germany	Pondage	1 640	1 640		0.0002		1 000	5	3 000	15	780	2 340		with
"	Tremorgio, Switzerland	Storage	2 900	2 900	6 000	0.3				13 000		12 000	12 000		with
1926	Rhone valley, Switzerland	Part head	2 930	300	7 710			530		1 500		4 200	8 400		
"	Kargegg, Germany		410												
"	Koenigstuhl, "		1 480												without
"	Walchen Lake, "							24 000							
1927	Niederwartha, "	Pondage	460	460		0.07	0.07	27 000	350	108 000	1 400	30 000	120 000		
"	Hemfurth, "	Storage	130	130				8 400	480	16 800	960		33 000		with
"	Hengstey, "	Pondage	520	520		0.04	0.04	34 000	420	102 000	1 260	45 000	180 000		with
"	Mittweida, "														
"	Munich, "														
"	Maen, Italy	Part head	2 730	820	6 900										with
"	Luner Lake, Austria	"	4 500	1 600	6 360										with
"	Rocky River, U.S.A.	Storage	230	230	430	6.00		8 100	250	16 200	500	33 300	33 300		with

Table II. List of Proposed European Plants

Date of Construction	Location	Types	Static Head in feet		Reservoir elevation in feet	Present Net Reservoir Capacity in Billion cubic feet		Present Pumps				Horse Power Capacity of Present Turbines		Reservoir with or without natural inflow	
			Power	Pumping		Head-water	Tail-water	Largest		Total		Largest	Total		
								Horse-power	Cubic feet per second	Horse-power	Cubic feet per second				
1914	Colmer, Haut-Rhin, France		330	330											with
1927	Chemnitz-Zwickau Region, Germany														
"	Leipzig, Germany														
"	Dresden, "														
"	Struden, "		510	510		1.00						107 000			with
"	Our River (near Stolzenberg)	Storage				23.00	0.30			250 000		600 000			with
"	Siemens-Schuckert System, "	Pondage	820	820		0.004		6 550	56	13 100	112	10 900	43 600		without
"	Hagen, Westphalia, "	"	570	570									12 000		
"	Laacher Lake	"			900										with
"	Mort Lake (near Grenoble), France	Storage			2 050	0.2		4 800					12 500		with