

揚水發電의 一般原理 및 特性

General Principle and
Characteristics of Pumped
Storage Hydro Electric
Power Generation

玄 正 鵬

動力資源部 電力局 水火力發電課長

1. 序 論

電力需要의 持續的인 成長과 大容量 原子力 및 石炭火力 發電을 主軸으로 한 電源構成의 變貌에 對備하여 經濟的이고 安定된 系統運用을 도모하려면 尖頭負荷 및 周波數 調整 電源으로서의 揚水發電은 必要한 電源設備로서의 價値를 充分히 지니게 되었다.

이 發電方式은 外國에서도 相當 範圍가 이미 運用되고 있고 우리나라에서도 現在 2個所(400MW의 淸平 揚水, 600MW의 三浪津) 揚水發電所가 稼動中에 있으며, 1995년에 600MW의 茂朱揚水發電所 준공을 計劃하고 있다. 그러므로 여기에서는 揚水發電의 概念 및 一部事項에 對하여 간단히 記述하여 關係人의 理解를 돕고자 한다.

2. 揚水發電이란?

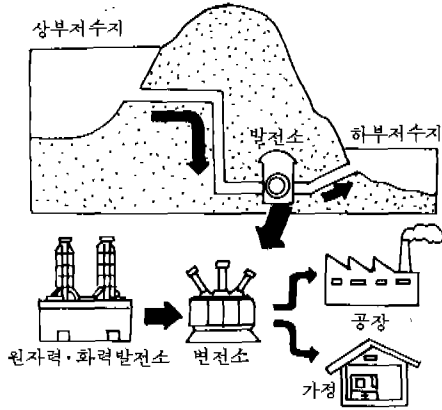
물을 利用하고 貯水池를 필요로 한다는 點에서는 一般 水力發電과 비슷하나, 運用方式 및 特性이 水力과 相異하여 貯水池가 上部, 下部에 2個가 있어야 하며, 一定量의 물을 두 貯水池 사이에 往復시키면서 電力을 發生하기도 하고 消費하기도 하므로 一般 水力發電과는 그 性質을 달리한다. (그림1 參照)

卽 揚水發電은 電力의 消費가 가장 적은 深夜에 剩餘電力을 動力으로 利用하여 下部 貯水池에 貯流되어 있는 물을 높은 곳에 자리잡은 上部 貯水池에 揚水하였다가 晝間 또는 夜間의 尖頭負荷時(Peak Time)나 系統事故 때 이 물을 다시 下部 貯水池에 放流하면서 發電하는 發電方式으로 尖頭負荷 運轉과 大型火力, 原子力 發電所의 效率向上 및 豫備電力으로서 全 系統의 信賴度 向上에 寄與한다.

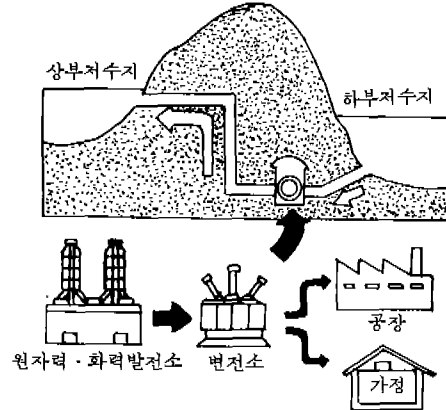
그림 2를 어떤 系統의 日間負荷 曲線이라 하면 深夜와 尖頭사이에는 負荷의 差異가 심함을 알 수 있다.

한편 이 負荷의 時間的 變化는 電力設備의 經濟性을 고려할 때에는 가급적 적어서 時間의 變動에 관계없이 一定한 狀態를 유지해 주는 것이 바람직

발전중



양수중



〈그림-1〉

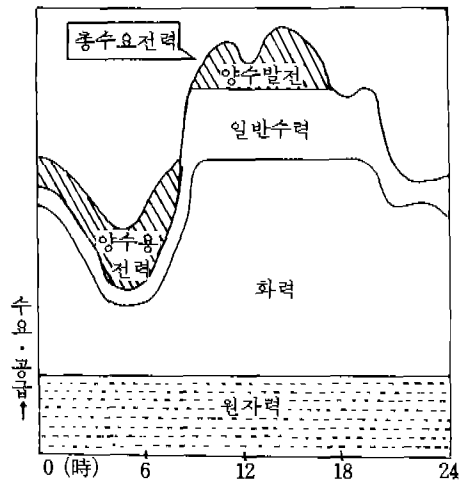
하나 社會活動 構造上 이러한 變動은 불가피한 것이다. 따라서 深夜에는 一部 發電設備을 減發하거나 停止해야 하기 때문에 利用率 低下로 因한 發電 效率의 低下를 조래하므로 短時間 持續되는 尖頭電力의 供給에 맞는 特定한 電源設備을 갖춰야 한다.

揚水發電은 이러한 需要의 不均衡을 어느 程度 平準化 시키는데 寄與하고 있다.

即, 그림 2의 斜線으로 表示된 部分과 같이 深夜에는 剩餘電力을 揚水動力으로 使用하여 下部 貯水池의 물을 上部 貯水池로 揚水하므로 深夜의 電力 需要를 높여 주게 되며, 尖頭時間에는 上部 貯水池의 물을 放流하면서 電力을 供給함으로써 全体 設備(基低火力 및 原子力)의 利用率을 높인다는 利點을 지니고 있다.

다시 말하면, 利用 價値가 낮은 時間帶의 電氣를 利用 價値가 높은 時間帶의 電氣로 바꾸어 주고, 또 한편으로는 電力을 必要時間에 쓸 수 있도록 貯藏하는 蓄電池(Storage Battery)의 역할을 한다고도 할 수 있다.

여기서 特記해야 할 것은 揚水發電所는 自体 發電量의 約 1.5배에 該當하는 揚水 電力을 消費해야 하므로 所要電力을 效率이 40% 程度인 大容量 火力發電所로부터 受電한다 하더라도 揚水發電所의 效率이 前述한 바와 같이 約 70% (1/1.5) 이므로



〈그림-2〉

綜合效率은 대략 28% 程度에 불과하여 結果적으로 는 低效率 火力發電所의 效果와 비슷하다는 것이다.

그러나 深夜電力을 尖頭電力으로 變換시키는 時間的 相對價値는 他 尖頭 發電方式(水力, Gas Turbine, Peak 火力 등)의 投資 代替效果와 상쇄되어야 하므로 揚水發電의 妥當性은 立地나 設備의 技術性에 앞서 우선 電力系統 全般에 걸친 綜合 經濟性에 根據하게 되는 것이다.

3. 揚水發電所의 歷史

揚水發電이 最初로 運轉된 것은 1892년에 完成된 Swiss의 Lettern 發電所이다. 이 때는 水車-發電機와 Pump-電動機를 別途로 設置한 別置型이었으므로 지금 一般적으로 채택되고 있는 可逆 Pump-Turbine 形式과 견주어 볼 때 그간 상당한 技術開發이 이루어졌음을 알 수 있다. 그후 1910년에는 Italy의 Vibon 發電所가 建設되어 發電機와 電動機만을 共用으로 하는 發電方式이 채택되었으며, 1930년에 들어서는 可逆式 Pump 水車が 開發되어 1931년 Italy의 Lago Baiton과 獨逸의 Baldeny 發電所に 이를 使用하기에 이르렀다.

揚水發電所의 經濟性이 현저하게 향상된 것은 이 可逆式 Pump 水車が 實用化 되고서 부터이다.

以後 美國에서는 効率が 改善된 Pump Turbine이 開發되어 이를 Brazil의 Pedreira, 美國의 Flaiton과 Hiwassee 發電所に 채용했다.

한편 容量의 추이를 살펴보면 開發 初期에는 10,000KW 程度의 小規模의 것이었으나 그후 1963년에 完成된 美國의 Taum Sauk 發電所에서 175,000KW의 單位基를 택함을 비롯해서 開發容量도 大型化되어 現在는 電力系統을 고려하여 單位基 容量을 決定하고 있다.

4. 揚水發電所의 分類

가. 自流併用 揚水發電所

上部 貯水池에 自然流水가 있는 것을 말하며, 發電에 使用하는 물은 下部 貯水池에서 揚水한 것과 自流水를 합쳐서 利用한다.

(1) 季節 揚水型

上部 貯水池를 天然湖水 또는 大容量의 貯水池인 地點에 채택할 수 있는 方式으로 溫水期에 對備하여 自流以外에 下部 貯水池로부터 揚水에 依해서 貯水를 增加시키는 方式인데 火力比率이 적은 Swiss, Austria등에 많다. 또한 일련의 下流 發電所의 出力 增加를 期待할 수 있는 경우에는 특히 有利하며,

日間, 晝間의 揚水 Cycle을 重疊하여 併用하는 것도 可能하다.

(2) 日間 揚水型

어떤 發電所가 系統에서 要求하는 Peak 繼續時間에 對備하여 自流水만으로 應할 수 없는 경우에는 揚水施設을 設置하여 Off-Peak時에 不足分을 揚水하여 所要 Peak時 出力을 確保하려는 方式이다.

나. 純 揚水式 發電所

上部 貯水池에 自流水가 전혀 없고, 發電에 使用하는 물은 모두 揚水에 依해서 얻는 方式이다.

(1) 季節 揚水型

上部 貯水池의 天然湖水를 利用하여 風水期에 揚水하여 湯水期에 普及용으로 利用하는 方式이며 純 揚水式으로는 드물지만 일련의 下流 發電所가 있는 경우에는 有利하다.

(2) 日間 揚水型

純 揚水式의 大部分은 이 方式으로서 獨逸·英國 등 火力比率이 높은 나라에서 深夜 또는 週末의 剩餘電力을 價値가 높은 午時의 Peak時에 尖頭電力으로 利用하기 위한 方法이다.

系統의 火力 構成比率이 높아짐에 따라 이 方式의 채용이 많아져 가고 있으며 性格上 大容量의 發電所가 많다.

이 方式은 貯水容量을 적게할 수 있으므로 地點 選定에 自由度가 많으며, 따라서 揚水發電所가 지녀야 할 低廉한 建設費로써 그 妥當性을 살릴 수 있으며 送電 經費도 節減할 수 있게되어 經濟性 면에서 有利하다고 알려져 있다.

다. 海水 揚水發電所

海岸附近에 表高가 높은 上部 貯水池를 設置할 수 있는 地形이 있으면 下部 貯水池로서 바다를 利用하는 方式으로 海水에 依한 機器의 腐蝕, 上部貯水池에서의 海水의 沈水에 의한 障害가 解決될 수 있다면 有利한 發電方式이 될 수 있다.

5. 揚水 發電所의 機械型式

가. 別置式(發電機-水車, 電動機-Pump)

發電用 Unit와 揚水用 Unit를 別個로 設置하는 方式인데 初期의 揚水 發電所는 이 型式이었다.

水車 및 Pump의 出力, 回轉速度를 제각기 最適值로 選擇할 수 있어서 機器 效率는 좋지만 投資費가 높아진다.

나. Tandem式(立軸型:發電 電動機-水車-Pump, 橫軸型 水車-發電 電動機-Pump)

發電機와 電動機를 共用으로 하고 이것과 動軸의 양쪽에 Pump와 水車を 각각 直結하는 方式이며, 別置型에 比해 經濟的이다.

發電의 경우에는 Pump가 無負荷 運轉이 된다. 따라서 無負荷機가 水面以下에 回轉할 때 생기는 空轉損失을 輕減하기 위해 Runner에 닿는 물을 壓下시키는 裝置를 갖는다.

立軸의 경우 最下部에 位置하는 Pump는 發電時에 Coupling에 依해 離脫되도록 해놓고 發電-揚水の 切換時間이 극히 짧은 것이 要求될 경우에는 運轉時 切換 可能한 Hydraulic Coupling을 쓰는 경우도 있다.

水車와 Pump는 제각기 構造를 獨立해서 設計할 수 있기 때문에 機器 自體의 效率가 좋고 可逆式의 技術的採擇이 어려운 高落差 領域일수록 經濟的으로 有利하게 된다.

다. 可逆式(發電機·電動機-Pump-Turbine)

發電機·電動機만 共用하는 것이 아니고 水車와 Pump도 共用하는 方式으로 揚水와 發電에는 回轉方向이 反對로 된다.

이 方式은 建設費가 가장 低廉하다.

요즘 Pump-水車의 設計技術이 發展되어 最近의 揚水 發電所는 設備의 單純化에 따른 建設費의 低下, 運轉에 對한 信賴度의 向上, 揚水-發電 轉換의 迅速성을 圖謀하기 위하여 大部分 이 方式을 採擇하고 있다.

Pump-turbine은 落差範圍에 따라 50-500m에는 Francis型 20-150m에는 斜流型, 20m以下에는 軸

流型이 利用된다.

또한, 落差變動이 큰 揚水發電所에서는 이 速度方式의 採擇이 經濟性이 좋을 경우가 있다.

即 Pump 運轉時(특히 高揚程時)에는 高速度로 運轉하고, 水車運轉時나 低揚程의 Pump 運轉時에는 低速度로 運轉하면 綜合效率가 좋아진다.

그러나 發電電動機로는 이 速度를 얻기 위한 構造는 簡單하지 않다.

6. 揚水發電의 特徵

가. 揚水發電所의 一般의 特性

(1) 揚水發電所는 外見上으로는 水力發電所와 비슷하나 供給力의 視點에서는 速應性 있는 低能率火力이라고 볼 수도 있다.

揚水發電은 起動에서 全 出力까지 不過 數分 程度밖에 所要되지 않고 또 負荷變動時의 出力 追從性도 火力發電보다 優秀하므로 系統 運用上으로는 一般水力和 同類로 取扱되나, 揚水動力(燃料費)이 必要하다는 點에서는 火力發電所와 비슷하다.

(2) 揚水發電所는 貯水池 容量에 依해 運轉時間의 制限을 받는다.

揚水發電所의 貯水池 容量은 揚水發電의 經濟性을 크게 좌우하는 要素이므로 이에 限界가 있다. 또한, 日間 調整池式 揚水發電所에서는 Peak時에 使用할 물을 深夜에 揚水해야 하는바, 이 揚水時間은 輕負荷時의 系統의 增分出力(火力)과의 關係때문에 通常 深夜 8時間 程度에 限定되므로 發電時는 最大出力으로 5~6時間程度가 運轉의 限界라 볼 수 있다.

(3) 揚水發電은 一般水力和 같이 河川流量등의 制限을 받지 않으므로 運用의 自由度와 確實性이 높다.

揚水發電은 供給力이 不足할 때는 揚水를 하지않고 必要時에는 多少 原價가 높은 火力의 餘力을 動力으로 利用 할 수 있으므로 系統運用面에서 融通性을 크게 保有하게 된다.

나. 電力需給 및 運用上의 特性

前述한 바와 같이 揚水發電은 低效率 火力과 貯水池 水力, 兩者의 特性을 겸하고 있으나 이들에게 없는 揚水運轉이란 點을 가지고 있으며 電力需給과 系統運用面에서는 다음과 같은 역할을 한다.

(1) 運轉豫備力에 의한 信賴度 向上

揚水發電은 起動과 負荷 速應性이 빠르므로 事故 또는 負荷의 急變時에 需給 均衡을 維持할 수 있으므로 運轉豫備力으로 活用된다.

예를 들면 揚水運轉時 大容量 火力 및 原子力發電의 脫落으로 인한 系統動搖가 發生하면 揚水負荷遮斷에 의한 供給力 回復으로 系統 保護가 可能하며 또한 이때 發電側으로 신속히 轉換하면 發電所 容量이 2 배에 해당하는 電力을 供給하는 結果가 된다. 또한 系統에 併入된채 電動機 運轉을 하는 Motoring 方式을 채택하면 瞬動豫備力으로서의 速應性和 確實性을 期待할 수 있다. 이 Motoring 狀態에서 全出力까지의 所要時間은 水路系에 支障이 없다면 各 2分 程度이다.

(2) 負荷追從 運轉에 의한 周波數 制御

日間の 負荷上昇時에 負荷追從用 供給力으로 使用하면 系統周波數를 規定值로 維持할 수 있다.

(3) 火力의 起動, 停止回數의 輕減, 火力의 빈번한 起動, 停止는 經濟的 損失일 뿐더러, 機器의 壽命減少 給電 操作上의 번잡등을 隨伴하므로 起動停止가 容易한 揚水發電을 尖頭供給用으로 使用하면 火力의 起動停止回數를 줄일 수 있다.

(4) 大容量 火力의 運轉效率 向上

深夜의 揚水發電은 深夜負荷를 增加시켜 주므로 大容量 火力의 出力 制限을 緩和시킬 수 있으며 經濟性 向上을 圖謀할 수 있다.

(5) 系統電壓을 유지하기 위한 無効電力의 供給

揚水發電은 대부분 容量이 크고 比較的 需要地에 가깝게 位置하게 된다. 따라서 揚水發電所에 依한 無効電力의 供給 및 吸收는 遠方의 水力이나 小容量의 柱上設備에 비해 系統의 電壓制御面에서 아주 效果를 發揮할 수 있다.

7. 揚水發電 計劃時 고려사항

一般水力에서 高찰되는 것외에 다음과 같은 點에 留意하여 計劃한다.

가. 設置地點 選定

각기의 流域面積에 관계없이 上部 貯水池와 下部 貯水池가 가까울수록 또한 그 落差가 큰 地點일수록 有利하다. 水路損失을 最小化하기 위해서는 水路길이도 可能的 짧을수록 有利하다. 揚水發電所는 短時間의 Peak 供給用이기 때문에 특히 KW當 建設費가 低廉한 것이 제일의 條件이 된다.

揚水用 動力의 受電을 高찰해서 送電 損失面에서 需要地로부터 가까운 것이 좋으나 原子力發電所 근처의 地點을 구하는 것도 系統運用上 有利한 點이 많다.

貯水池의 容量은 日間 揚水型의 경우라도 晝間運用을 高찰해서 5~7時間의 Peak Load 繼續 運轉이 充分하도록 한다. 더우기 運轉豫備力으로서의 價値를 重視할 경우는 流域變異의 可能性을 高찰하고 既設 貯水池나 調整池式 發電所를 調整해서 下流發電所의 出力 增加 日間 揚水 Cycle의 併用등을 檢討해서 地點을 選定한다.

나. 經濟性

揚水發電은 個別地點 評價에 앞서 電力系統에서 包含할 수 있는 妥當 容量의 테두리가 定해진다.

一般的으로 投入比率을 決定하는 主要要素로는 需要特性(크기 및 負荷率), 發電型式의 構成, 燃料費 單價 및 揚水發電所 建設單價등이 있는데 보통 年間 運轉費의 시뮬레이션에 依해 最適運轉量 또는 最適設備容量을 決定한다.

即, 年間 適正 揚水發電量을 決定할 때는 주어진 年間 負荷豫測 資料를 土台로 運轉費 Simulation 技法을 利用하여 年間 發電系統 運轉費가 最小로 되는 點을 찾고, 年間 最適 揚水 發電所 容量을 決定하는 경우에는 年間 負荷豫測 資料와 各 發電所別 年間 固定費 및 燃料費 資料를 利用하여 設備容量別 最適點을 구한 다음 그 가운데 가장 작은 年間 發電費用을 發生시키는 設備容量을 구한다.

다. 揚水發電과 綜合效率

揚水發電의 綜合效率은 發電電力量과 이것에 對應하는 揚水電力量의 比로서 60~70%에 지나지 않는다.

그러나 季節 揚水の 경우에는 下流 發電所의 發電量을 舍할 수 있기 때문에 特히 向上 되는 수도 있다.

〈揚水發電의 過程別 損失內譯表〉

區 分	設備損失(%)	區 分	設備損失(%)
揚水時	變壓器 0.5	發電時	水壓管 2.0
	電動機 2.5		水 車 10.0
	水 車 11.0		發電機 2.5
	水壓管 2.0		變壓器 0.5

綜合效率 約72%(送·發損失除外)

※ 損失評價順序: 揚水時 變壓器-發電時 變壓器

發電電動機를 使用하는 경우 發電出力과 受電 電力은 대체로 같이 취하기 때문에 다음과 같은 關係가 있다.

$$\text{揚水發電效果} = T_1 / T_2$$

T_1 : 發電時間 T_2 : 揚水時間

또 發電-揚水 1cycle에 있어서 利得(Won)은

$$V = P \cdot T_1 (a_1 - a_2 / T_2)$$

P : 發電電力(=受電電力) (KW)

a_1 : 發電時系統의 電力量單價 (Won/KWh)

a_2 : 揚水時系統의 電力量 單價 (Won /KWh)

8. 우리나라의 揚水發電所 現況

가. 運營中인 發電所

(1) 淸平揚水發電所

이 地點은 京畿道 加平郡 既存 淸平發電所로부터 約 10km 上流가 된다. 發電所는 淸平貯水池를 下部貯水池로 하고 總落差 約 480m를 갖는 地點 위에 Rock-fill Dam 築造로 이루어진 上部 貯水池와 地下發電所 및 이들을 連結하는 水壓管路, 放水路 등으로 構成되어 있는 純揚水發電所이다. 設備容量

은 400MW (200MW×2)이며 電力의 送·受電은 超 高压 345KV 東서울 變電所에 154KV線路로 連結되어 있으며 80年 3月에 준공되어 가동에 들어갔다.

系統運用面에서는 京仁地區의 需要特性 (낮은 負荷率) 및 成長 趨勢와 地域別 發電力의 分布狀況등을 감안하여 分析한 결과 優先順位가 賦與되었다.

(2) 三浪津 揚水發電所

慶尙南道 密陽郡에 位置하며, 上·下部 貯水池의 築造로 約 340m의 總落差를 얻어 600MW (300MW×2) 規模의 設備容量을 保有하고 있으며 純揚水式 地下發電所이다.

나. 建設豫定 發電所

(1) 茂朱 揚水發電所

- 位置: 全北 茂朱郡 赤裳面(德裕山國立公園內)
- 型式: 純揚水式 地下發電所(可逆Francis터빈)
- 容量: 600MW (300MW×2)
- 工事期間: '89. 7 - '95. 6 (72個月)
- 貯水池容量: 6時間 發電可能容量

9. 結 論

揚水發電도 다른 發電設備과 마찬가지로 電力系統의 일익을 擔當하는 重要設備로서 우리나라에서 도 이미 運營 또는 建設 計劃中에 있고, 또한 經濟性이 있을시에는 繼續 開發될 것이다.

다만 아직도 揚水發電이 미흡한 點이 있다면 揚水時에 負荷調節이 안된다는 技術的인 未解決 事項이 있는바, 向後 좀더 나은 揚水發電을 위해서는 繼續的인 技術開發에 박차를 가하여야 할 것이다.

*