

電力系統의 經濟運用

金 俊 鉉
(漢陽大 工大 教授)

■ 차 례 ■

- 1. 概 要
- 2. 水力系統의 經濟運用
- 3. 火力系統의 經濟運用
- 4. 水火力綜合 經濟運用
- 5. 結言
- 參 考 文 獻

① 概 要

電力系統을 구성하고 있는 水力, 火力, 原子力發電所, 變電所, 開閉所 및 이들을 연결하고 있는 送配電線의 규모가 電力需要의 현저한 증가와 더불어 더욱 巨大化, 複雜化됨에 따라, 需用家에 安定한 良質의 電力을 저렴하게 供給하기 위해서는 이들 設備를 보다 合理的, 經濟的으로 運用할 必要性이 점차 높아지고 있다.

이러한 電力系統의 經濟運用目的은 系統構成 要素들을 적절하게 運用함으로써 總 運用費用을 最小化하는 것인데, 이 目的을 달성하기 위해서는 미리 合理的인 長·短 運用計劃을 수립하고, 그 計劃에 입각하여 系統을 運用制御해야 할 것이다.

이와 같이 系統의 運用計劃을 수립하는 것은 系統運用에 대단히 큰 의미를 지니고 있으며, 複雜한 電力系統의 諸條件을 충분히 고려한 經濟運用計劃의 수립은 대단히 어려운 문제가 된다.

그러나 근년 電子計算技術의 급속한 발전으로 大電力系統의 經濟運用に 관한 여러 算法들이 개발되어 實用化 되고 있으며, 이에 대한 算法의 개선을 위한 연구가 활발히 진행되고 있다.

本稿에서는 電力系統의 經濟運을 위해 고려해야 할 기본사항과 일반적인 經濟運用計劃算法를 간략하게 소개 함으로서 電力系統에 관심이 있는 會員

諸位의 理解를 돕고져 한다.

② 水力系統의 經濟運用

1) 水力發電所의 經濟運用原則

水力發電所는 그 형식에 따라 調整能力이 크게 다르며, 火主水從의 電力系統에서는 水力調整能力을 尖頭供給力으로 運用하고, 調整能力이 없는 流込式 水力은 基底供給力으로 運用하는 것이 原則이다. 이 경우 각 水力發電所의 調整能力을 限界까지 활용하는 것이 반드시 電力系統 全體의 經濟性을 만족하는 것은 아니므로, 이점을 검토하기 위해서는 電力需要의 日負荷曲線과의 관계를 충분히 고려해서 決定하여야 한다.

尖頭供給力으로서 水力發電所(揚水式 水力 포함)가 다른 형태의 尖頭供給力과 根本的으로 다른 점은 에너지 供給量이 限定되어 있는 점이다. 다시말해서, 火力發電所등의 尖頭供給力에서는 燃料만 供給해 주면 設備容量을 최대한으로 이용해서 發電을 계속할 수 있지만, 水力을 尖頭供給力으로 이용하는 경우에는 에너지 자원이 이용할 수 있는 水量에 의해 限定되므로 發電계속시간에 제한이 있다.

따라서, 水力發電所의 設備容量이 流量 또는 貯水量에 비해서 상대적으로 클 때는 需要狀態에 적합하도록 高出力으로 發電하면 發電可能時間이 짧아지고, 반대로 需要의 요구에 따라 一定時間 동안 發電을

계속하기 위해서는 출력을 감소시켜서 사용해야 한다.

그림 1은 이러한 개념을 나타낸 것이다.

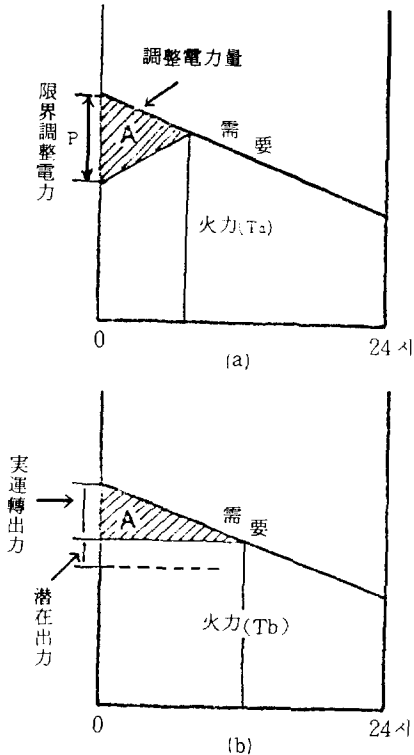


그림 1. 水力の調整運用 개념

持續曲線에 표시된 需要에 대해 限界 調整力 P 및 調整電力量 A를 갖는 水力和 火力을 組合해서 供給하는 경우에, 그림 (a)와 같이 調整能力을 최대한으로 活用한 水力發電所의 運用과, 그림 (b)와 같이 調整能力을 억제해서 運用하는 경우를 생각할 수 있다.

이 두가지의 運用方式을 比較하면 (b)의 運用方式이 並列火力發電機의 臺數가 적게 됨을 알 수 있다 ($T_a > T_b$)

따라서, (b)방식에 의한 運用에서는 火力發電機의 負荷率 및 熱效率이 향상되고, 燃料消費量이 적게 되므로 經濟的이다.

이와 같이, 가능한 한 火力發電機의 運用臺數를 줄이는 것이 經濟運用面에서 뿐만 아니라, 火力設備도 적게 되어 設備計劃面에서도 經濟的이므로 현재 電源開發計劃은 대부분 (b)와 같은 水力調整運用을 前提로 수립되고 있다.

(b)와 같은 運用을 할 경우의 限界調整電力과 實

運轉出力과의 差를 水力の 潛在出力이라 한다. 이것은 設備出力중 有效한 供給力이 되지않는 部分으로 電力需要가 증가하게 되면 潛在出力은 즉시 감소하는 성질이 있다.

따라서, 建設計劃時點에서 다소의 潛在出力이 발생하더라도 水力地點의 立地條件과 長期的 觀點에서 그것이 適當한 크기인 것으로 판단될 경우에는 가능한 한 潛在部分을 포함한 규모로 水力設備의 開發을 행하고 있다.

2) 連接水系 發電所의 經濟運用

大容量의 貯水池가 적고, 上下流 發電所의 影響을 무시하고 貯放流를 행할 수 없는 비교적 小容量의 貯水池, 調整池式 發電所가 연결되어 있는 連接水系의 경우가 많다. 예를들면, 北漢江水系에 華川, 春川, 衣岩, 淸平 및 八堂이 설치되어 있기 때문에 連接水系라 할 수 있다.

이와 같은 連接水系 發電所群의 經濟運用의 基本은, 주어진 日間 總 使用水量下에서 火力發電機群의 總 燃料費가 最少가 되도록 각 시간대의 使用水量을 決定하는 것이다.

이 경우 連接水系의 制約條件으로서 上流 發電所의 發電放流가 下流 發電所에 影響을 주므로, 調整池를 有效하게 사용해서 溢水放流가 생기지 않도록 할 필요가 있다. 이때문에 특히 溢水防止를 고려한 計算技法이 開發되었다.

대표적인 예로서 擴張協調方程式法과 強制制限法을 소개한다.

擴張協調方程式은 다음의 3식을 푸는 것이다.

먼저 火力發電機의 負荷配分을 각 發電機의 增分 燃料費가 均等 되도록 실시한다.

$$\frac{d_t F_i}{d_t P_{si}} = {}_t \lambda \left(1 - \frac{\partial {}_t P_L}{\partial {}_t P_{si}} \right) \quad (1)$$

단, ${}_t F_i$: i 번째 火力發電機의 燃料費

${}_t P_{si}$: i 번째 火力發電機의 出力

${}_t P_L$: 送電損失

${}_t \lambda$: 增分發電費用

t : 時刻

水力發電所에서도 마찬가지로 다음식에 의해 負荷를 配分한다.

$$({}_t r_j - {}_{t+\tau_j} r_{j+1}) \frac{\partial {}_t Q_j}{\partial {}_t P_{hj}} = {}_t \lambda \left(1 - \frac{\partial {}_t P_L}{\partial {}_t P_{hj}} \right) \quad (2)$$

단, ${}_t Q_j$: j 번째 水力發電所의 使用水量

${}_t P_{hj}$: j 번째 水力發電所의 出力

t_j : j번째 水力發電所 물의 假想單價
 τ_j : j번째 發電所에서 j+1번째 發電所
 까지 發電放流의 流下時間

식 (2)의 좌변은 對象 發電所의 增分使用水量 $\partial Q / \partial P$ 에 이 發電所의 發電放流에 의해 消費되는 물의 假想的인 價値를 곱한 것으로, 그 發電所에 貯水된 물의 單價와 直下 發電所 물의 單價와의 差가 消費된 물의 價値가 된다.

또한 溢水を 防止하기 위해 다음식이 주어진다.

$$\frac{d_i r_j}{dt} = -\lambda \left(1 - \frac{\partial_i P_L}{\partial_i P_{k_j}} \right) \frac{\partial_i P_{k_j}}{\partial_i S_j} + (t_j - t_j' \tau_{j+1}) \frac{\partial_i Q W_j}{\partial_i S_j} \quad (3)$$

단, t_j : j번째 水力發電所 調整池의 貯水量
 $i Q W_j$: j번째 水力發電所 dam의 溢水量
 τ_j : j번째 水力發電所 dam에서 j+1번째 發電所 dam까지 溢水의 流下時間

식 (3)의 우변 1항은 落差變動效果를 나타낸 것이다. 出力 P_{k_j} 가 貯水量 S_j 의 영향을 거의 받지 않는 水系에서는 1항을 생략할 수 있다. 2항의 $\partial Q W / \partial S$ 는 貯水量이 調整池의 上限을 초과해서 溢水가 발생하면 零으로부터 급격히 正의 큰 값으로 되어 r_j 가 큰 값이 된다. 따라서 溢水하기전 시간대의 使用水量을 증가시켜 溢水を 防止하게 된다.

強制制限法은 溢水量을 강제적으로 다른 시간대 또는 다른 發電所에 配分하는 방법으로, 溢水발생 전 시간대의 使用水量을 증가시키고 이후시간대의 使用水量을 그만큼 감소시키므로써 溢水を 防止한다.

3) 揚水式 發電所의 經濟運用

揚水式 發電所를 運用할 경우의 經濟性은 揚수에 필요한 費用이 이것을 사용해서 發電했을 경우의 火力發電機 燃料 節減額보다 적을 때 성립하는데, 일반적으로 그 運用효과는 다음과 같은 것들을 들 수 있다.

① 火力發電機의 高効率 運轉

剩餘電力 또는 深夜의 高効率 火力發電機의 低價値 電力을 이용하여 揚水하고 尖頭時에 高價値 電力을 發電함으로써 電力의 價値를 轉換한다. 이것은 深夜 火力發電機의 負荷率을 향상시키고, 昼間에 低能率 火力發電機를 감소시켜 經濟運用을 도모하는 것이다.

② 運轉豫備力으로의 活用

揚水式 發電所의 負荷變動에 대한 即應性을 이용

해서 運轉豫備力으로 活用한다.

이러한 運用效果를 얻기 위하여 今後 揚水式 發電所의 重要性이 점차 높아질 것으로 豫想되며, 運用效果(Merit) 算定方法을 몇가지 경우에 대하여 구체적으로 나타내면 다음과 같다.

㉠ 高効率 火力發電機에 의해 低効率 火力을 低減하는 경우

$$Merit = (P \times a) - \left(\frac{P}{\phi P} \times b \right) + c \quad (4)$$

단, P : 昼間 低効率 火力 低減電力量
 a : 低効率 火力 低減에 의한 減分單價
 ϕP : 揚水總合效率(= $\frac{\text{揚水發電電力量}}{\text{揚수에 필요한 電力量}}$)
 $\frac{P}{\phi P}$: 深夜 高効率 火力 增加 電力量
 b : 高効率 火力 增加에 의한 增分單價
 c : 低効率 火力機의 起動費

㉡ 高効率 火力機 n 臺가 部分負荷運轉(單機出力 P)중일 때 揚水發電所에 의해 1臺를 停止하고, $n-1$ 臺를 高負荷運轉(單機出力 P_{max})할 경우

$$\text{昼間: } n \times P \rightarrow (n-1) \times P_{max} + P' \quad (5)$$

$$\text{夜間: } n \times P_N \rightarrow (n-1) \times P'_N \quad (6)$$

단, P' : 揚水發電電力量
 P_N : n 臺의 경우 深夜單機出力
 P'_N : $n-1$ 臺의 경우 深夜單機出力

식 (5), (6)의 火力 增減分單價(熱効率 差에 따른)에 의해 Merit 를 구한다.

㉢ 運轉豫備力을 火力機에서 揚水發電所로 넘기는 경우

필요한 運轉豫備力을 揚水發電所에 부담시키고 火力機의 運轉臺數를 減少시키는 경우의 Merit

$$Merit = \{ (P_s \times a_s) - (P_t \times a_t) + c \} + \left\{ P \left(a - \frac{b}{\phi P} \right) \right\} \quad (7)$$

단, P_s : 停止機 電力量
 P_t : 出力增加機의 電力量
 a_s, a_t : 單價

와 같이 된다.

㉢ 火力系統의 經濟運用

1) 火力發電所의 經濟運用原則

火力發電所의 經濟運用은 水力發電所와 併用해서 送電損失을 고려하여, 電力系統 全體의 運用費가 最

수가 되도록 運轉하는 것이 原則이다. 따라서 運轉時 다음 사항들을 고려할 필요가 있다.

① 火力發電機의 運轉順位

일반적으로 系統潮流限界, 適正 運轉豫備力の 확보 등 系統運用에 필요한 制約條件을 고려하여 高效率 火力機로 부터 優先的으로 運轉順位를 決定한다.

② 高負荷 運轉

火力發電機의 定格出力時 熱效率은 最低負荷 運轉時에 비해 10〔%〕 정도 향상되므로 가능한 한 定格 負荷運轉이 되도록 起動 및 停止時期를 決定할 필요가 있다.

③ 連續運轉

火力發電機의 起動停止는 機器에 주어진 反復熱應力の 문제와 起動損失 등을 유발하므로 가능한 한 連續運轉하는 것이 좋다. 그러나 晝夜間의 需要의 差, 電源構成에 따라서는 夜間에 火力機의 일부를 停止하고 다음날 需要가 증가할 때 다시 起動시키는 소위 每日起動停止(Daily Start-Stop)를 행할 필요가

있게 된다. 이때 발생하는 起動損失과, 起動停止를 행하지 않기 위해 火力群 全體를 低負荷 運轉함으로써 생기는 效率減少 및 豐水期에 발생하는 水力剩餘電力量과의 비교에 의해 經濟效果를 評定한다.

2) 火力發電所間의 經濟負荷配分

火力總合燃料費가 最少가 되도록 각 火力發電機의 分擔負荷를 配分하는 方法으로는 일반적으로 等增分費法이 사용된다.

式 (1)에서 發電機出力의 合計가 (需要+送電損失)과 같게 되도록 λ 를 決定하면, 그 때의 增分費로부터 計算된 出力이 總合燃料費를 最少가 되게 한다.

$$h_n \frac{dH_n}{dP_n} \frac{1}{1 - \frac{\partial P_L}{\partial P_n}} = \lambda (n=1, 2, \dots, N) \quad (8)$$

단, $h_n \frac{dH_n}{dP_n}$: n 號機의 增分發電費用

표 1. 火力發電機 運轉臺數 決定算法의 比較

	算 法 的 概 要	特 徵	備 考
動的計劃法	○ 각 시간대의 運轉臺數를 優先 順位에 따라 DP에 의해 決定. ○ 각 시간대에서 구성가능한 모든 發電機의 組合를 고려한 段階過程문제로 하여 DP에 의해 最適解를 구한다.	○ 火力機의 諸條件을 容易하게 고려할 수 있다. ○ 系統 및 段階가 커지면 計算量이 많아지므로 適當한 보완기법이 필요하다.	豫備力을 고려하고, 計算範圍를 미리 規制하여 記憶量을 節減한다.
最利大停止法	○ 優先順位에 따라 n 臺와 $n-1$ 臺의 全燃料費의 差가 最大가 되도록 起動停止時點을 여러 組合으로부터 決定한다.	○ 1臺 마다 행하므로 計算이 간단하게 된다.	
優先順位法	○ 優先順位에 따라 增分費用 λ_k 와 發電單價 η_k 를 比較해서 ○ $\lambda_k < \eta_k$ 이면 優先順位가 가장 낮은 k 號機停止 ○ $\lambda_k > \eta_k$ 이면 優先順位가 높은 $k+1$ 號機起動 ○ 臺數變更으로 上記한 관계가 반대로 되면 總燃料費가 적은 쪽을 취한다.	○ 計算이 간단하다. ○ 解가 근사적이다.	起動費用을 고려하지 않는다.
決定函數法	○ n 臺와 $n-1$ 臺의 運轉燃料費 差의 時間에 관한 逆函數와 增分起動費의 積으로 決定函數를 定義하고 等單位負荷曲線과의 交點을 구한다.	○ 機數가 적을 때는 手計算 可能하다. 機數가 많을 때는 많은 決定函數의 計算을 요함.	系統負荷全域에서 n 臺時의 燃料費 f_n 이 $n-1$ 臺의 燃料費 f_{n-1} 보다 클 때는 解가 존재하지 않는다. 이때는 보통 最少臺數로 運轉한다.

h_n : 燃料單位

$\frac{dH_n}{dP_n}$: 增分熱消費率

$\frac{\partial P_L}{\partial P_n}$: n 號機의 增分送電損失率

λ : 負荷中心點의 增分費用을 의미하는 Lagrange 未定係數

火力發電所의 燃料를 一定值로 유지하면서 經濟負荷配分을 행해야 할 때가 있다. 이때에는 식 (8)을 약간 변형하여

$$(h_n - \xi_n) \frac{dH_n}{dP_n} \frac{1}{1 - \frac{\partial P_L}{\partial P_n}} = \lambda \quad (n = 1, 2, \dots, N) \quad (9)$$

단, ξ_n : 燃料單價 增減費를 의미하는 Lagrange 未定係數

식 (9)에서 燃料使用量이 豫定值가 되도록 ξ_n 을 調整해서 反復計算을 행한다.

3) 火力發電機 運轉台數 決定

前述한 바와 같이 火力系統에서는 負荷點에서 本火力發電機의 增分燃料費가 均등하게 되도록 각 發電機의 出力을 決定해 주면, 이것이 가장 經濟的인 負

荷配分이 되지만, 이것은 어디까지나 系統에 並列할 發電機가 정해져 있음을 전제로 한 것이다. 따라서, 먼저 並列運轉할 發電機를 결정한 후 이들 發電機로 經濟負荷配分을 행하게 된다. 이때 너무 빈번한 起動停止는 바람직하지 못하고 再起動에도 상당한 時間과 費用을 요하므로, 이들을 고려할 수 있도록 적절한 制約條件을 만족하면서 總燃料費用을 最少로 하는 起動停止計劃을 수립해야 한다. 또한 최근 電力系統의 安全運用 추세에 따라 系統의 安全性 역시 중요한 문제로 대두되고 있으므로 並列發電機臺數를 決定할 때 이점도 고려해야 할 것으로 생각된다.

표 1은 火力機의 運轉臺數 決定算法들을 比較, 要約한 것이다.

④ 水火力總合 經濟運用

實際의 電力系統은 水力 및 火力發電所가 그 構成의 主體를 이루고 있으므로, 水火力을 總合한 經濟運用을 고려할 필요가 있다.

水火力系統에 있어서 經濟運用 문제는 一定期間內의 總需要量과 河川의 出水를 豫測하고, 그 需要에 적합한 가장 經濟的인 水火力發電所의 發電計劃을

표 2. 水火力總合 經濟運用計劃 計算法의 比較

	計算法의 概要	特 徵	備 考
協調方程式法	초기 시간대의 水單價(r)를 적당히 變更해서 貯水池制限值를 만족할 때 각 시간대의 r 를 決定한다. 使用水量은 協調方程式을 풀어서 구한다.	水單價의 變更에 따른 使用水量 變化特性을 이용한 것으로, 對象發電所가 많아도 적용이 가능하다.	水力效率이 거의 변동이 없으면 수렴이 어렵다
動的計劃法	最適性原理를 적용해서 모든 時點, 貯水量이 정해진 水火力 併用系統의 最適化문제를 2시간대의 最適化문제로 환원하고, 이로부터 全 시간대의 總燃料費가 最少가 되는 計劃을 구한다.	燃料費最少의 解를 구할 수 있으며 長期運用計劃에 적당하다. 對象發電所가 많아지면 計算規模가 상당히 커 지므로 이때는 弛緩法을 適用한다.	초기치를 지정할 필요가 없고, 最適化 計算의 時系列方向은 문제가 안된다.
線計劃型法	一次式으로 근사화된 制約條件中에서 總燃料費를 最少로 하는 貯水量發電을 구한다.	對象發電所 및 시간대가 많을 때는 計算量이 많아진다.	
最大傾斜法	考察期間의 全燃料費가 減少하는 方向으로 獨立變數를 조금씩 修正하고 全燃料費가 最少가 될 때까지 反復한다.	對象發電所가 많은 경우에도 적용 가능하며 運用制約에 걸린 경우의 처리 방법으로써 強制制限法과 Penalty 법이 있다.	初期值의 指定이 필요하고 修正係數의 선정이 중요하다.
最原理大法	Pontryagin 最大原理의 基本式을 적용하고 Hamilton 函數를 도입해서 이것을 最大化하고 貯水量 端點條件을 만족시킨다.	貯水量制限을 理論적으로 고려할 수 있다. 記憶容量이 적어도 된다.	假想水單價의 初期值를 指定한다.

세우는 것이다.

지금, 시간대 t 에서 i 火力發電所의 出力을 tP_{si} , 燃料費를 tF_i , 水力發電所의 出力을 tP_{hi} , 貯水量을 tS_r , 使用水量을 tQ_r , 水位를 tH_r , 負荷를 tP_R , 送電損失을 tP_L 이라 하면, 諸制約條件式은

$$\begin{aligned} \text{貯水量 制限} &: \underline{S_r} \leq tS_r \leq \overline{S_r} \\ \text{使用水量 制限} &: \underline{Q_r} \leq tQ_r \leq \overline{Q_r} \\ \text{水力出力 制限} &: \underline{P_{hj}} \leq tP_{hj} \leq \overline{P_{hj}} \\ \text{火力出力 制限} &: \underline{P_{si}} \leq tP_{si} \leq \overline{P_{si}} \end{aligned} \quad (10)$$

와 같이 되고, 諸特性式 및 關係式은 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \text{電力平衡式} &: \sum_i tP_{si} + \sum_j tP_{hj} - tP_L = tP_R \\ \text{火力燃料費} &: tF_i = \alpha_i + \beta_i P_{si} + \tau_i P_{si}^2 \\ \text{水力出力} &: tP_{hj} = tH_j (tQ_r - Q_{r0}) \\ \text{貯水量條件} &: t_{+1}S_r = tS_r + tJ_r - tQ_r \end{aligned} \quad (11)$$

가장 經濟的인 運用은 이들의 條件下에서 總燃料費를 最少化하는 것이다.

$$F = \sum_{i=1}^N F_i (tP_{si}) \longrightarrow M_{in} \quad (12)$$

이와 같은 문제의 解法으로는 協調方法, 動的計劃法, 線型計劃法, 最大傾斜法, 最大原理法 등이 있는데 이들의 概要와 特徵을 要約하면 표 2와 같다.

5 結 言

이상 電力系統을 經濟的으로 運用하기 위해 고려해야 할 몇가지 基本事項과 일반적인 計劃計算技法을 要約 紹介하였다.

현재 우리나라에서는 脫石油時策의 一選으로 大容量 原子力 및 LNG火力發電所의 建設을 추진하고 있으나, 아직은 石油火力의 占有率이 상당히 높은 수준에 있는 실정이므로, 經濟運用의 主要 대상이 되는 이들 火力設備의 高效率運轉이 實실히 要求되고 있다.

따라서, 이러한 經濟運用目的을 달성하기 위해, 運用計劃의 決定要素가 되는 負荷豫測, 出水豫測, 並列發電機 臺數決定, 經濟負荷配分 및 自動發電制御 등에 관한 算法의 개선이 先行되어야 할 것으로 생각된다.

參 考 文 獻

- 1) M. E. El-Hawary, G.S. Christensen ; " Optimal Economic Operation of Electric Power Systems", Academic Press, New York, 1979
- 2) 関根泰次, "電力系統工學", 電氣書院, 1976
- 3) 中野友雄 外, "電力系統 計劃과 運用", 電力新報社, 1979

謹

賀

新

年

甲子年 元旦

大韓電氣學會 任職員一同