

電力系統의 經濟運用問題

〈水火系統의 經濟運用計劃 計算法에 關하여〉

韓國電力株式會社・技術部・技術役
工學博士 宋 吉 永

(第 1 回)

1. 緒 言

韓國의 電力系統은 第2次 電源開發 5 年計劃 (1967~1971年)의 推進으로 最終年度에는 急増하고 있는 電力需要에 充分히 應할 수 있는 供給力을 確保함과 同時에 어느 程度의 豫備力을 가질 것을 當面的 目標로 하고 있다.

이와 같은 電源開發計劃으로 어느 程度 需給의 均衡이 安定됨에 따라서 系統運用的 焦點은 보다 나은 電氣의 質의 向上과 系統의 經濟的 運用에 두어야 한다는 것은 더 말할 必要가 없을 것이다.

周知하는 바와 같이 韓國電力系統의 構成은 水火力併用系統이며 더욱이 水力電源은 大容量貯水池를 가지지 못하고, 調整容量이 작은 調整式水力 및 自流式水力이 大部分으로 되고 있다.

1966年末 現在 水火力의 構成比는 28 : 72로 되어 있으나 今後의 傾向으로서는 需要의 急増과 開發地點上의 關係로 火力이 占하는 比率이 해가 갈수록 높아질 것으로 豫想되지만 尖頭負荷處理能力 등에 着目할 경우 今後라 한들 水力이 占하는 效果가 크게 減少되리라고는 생각되지 않는다.

이러한 觀點에서 將來 韓國電力系統의 經濟運用 問題를 取扱하기 爲하여서는 韓國系統에 꼭 알맞은 獨自의 系統經濟運用方式을 確立할 것이 크게 要望되는 것이다.

이와 같은 水火力併用系統의 運用에 있어서는 火力發電所群과 水力發電所群을 別途로 나누어 생각할 수는 없는 것이며 어디까지나 兩者를 一體로 한 系統에 있어서 火力發電所에 있어서의 燃料費(發電 코스트)를 最少로 하는 水火力 各 發電所의 運用을

追求하여야 할 것이다.

一般적으로 水火力系統을 經濟적으로 運用に 나가기 爲하여서는 年間, 月間 等の 長期發電計劃에 依據하여 週間, 日間 等の 運用計劃이 作成되고 이들 計劃이 만들어지는 過程에 있어서는 恒常 豫想의 相異에 따른 計劃의 修正이 隨伴되어야 한다. 年間, 季間 等の 考察期間이 긴 경우의 發電計劃 또는 月間, 週間, 日間 等の 比較的 考察期間이 짧은 경우의 運用計劃計算法으로서는 이미 여러가지 方法이 開發되고 있다.

水火力系統의 經濟的 運用計劃은 所謂 말하는 經濟的 負荷配分計算法만으로써 決定될 것이 아니고 다음에 보는 바와 같은 諸計劃이 總合된 然後에 決定되어야 할 것이다.

(1) 長期運用計劃

- ① 水火力系統의 經濟的發電計劃
- ② 發電設備의 定期補修計劃
- ③ 供給信賴度 維持計劃

(2) 短期運用計劃

- ① 水火力系統의 經濟運用計劃
- ② 發電機의 經濟的 起動停止計劃
- ③ 揚水發電所의 經濟的運用計劃
- ④ 運轉豫備力의 配分計劃

註: 이들의 計劃에 先行하여 가장 重要하고 또한 困難한 問題로서 計劃의 對象으로 하는 期間에 걸친 系統負荷와 流入量을 豫想하는 問題가 있다.

上述한 諸 計劃計算法 및 豫想計算法에 關하여서는 先進國 各 電力會社에서 銳意 研究開發中에 있으며 이미 一部の 計算을 實運用計劃에 利用하고 있는 會社도 있다.

本稿에서는 몇 차례에 걸쳐 經濟運用計劃問題에 있어서의 問題의 定義와 그 解法 및 Digital 計算手法에 關하여 說明하고 아울러 不遠 우리나라에도 導入되어야 할 經濟運用計算裝置의 概況을 說明코자 한다.

2. 經濟運用計劃問題

電力系統의 經濟運用이라는 概念을 廣義로 解釋하면 「電力系統의 運用에 있어서 經濟的 效果를 올릴 수 있는 方法」은 모두 包含하게 되지만 本稿에서는 「水火力發電所의 combination 및 負荷配分을 適切하게 實行함으로써 水火力發電所에 있어서의 總燃料費를 最少로 하는 運用」이라고 限定하여 說明하기로 하였다. 但 여기서 말하는 「運用」이라는 것은 既設設備를 利用하는 경우를 생각하고 있으므로 設備의 新設이나 更新 등에 對하여서는 言及하지 않기로 한다.

따라서 問題는 「주어진 電力系統의 諸設備(水力, 火力 各發電所와 送電線 등)로부터 定해지는 諸制限(水力使用水量, 貯水量, 火力出力, 河川條件 등)의 範圍內에서 주어진 流入量을 使用하여 指定된 負荷에 電力을 供給할 경우에 考察하는 期間(1年, 1日 등) 內에 있어서의 總火力燃料費를 最少(이러한 狀態를 最經濟的 또는 最適이라 稱함)로 되게끔 各設備의 運用을 決定하라」라고 말할 수 있을 것이다.

여기서 注意해 두고 싶은 點이 있다.

그것은 「考察하는 期間」이라는 것인데 이것은 1年이라는 긴 期間을 생각할 수도 있고 또는 하루에만 限하여 생각할 경우도 있을 것이다. 이와 같은 考察期間의 長短에 따라 問題가 달라질 것이며 또 이에 따른 解析方法도 달라질 것이다.

考察하는 期間의 길이에 따라 長期運用計劃(年~月 程度), 短期運用計劃(週~日 程度) 및 瞬時運用制御의 三者로 大別하여 생각할 수 있을 것이다.

1年間의 運用을 實行해 나갈 것을 생각하여 본다면 年間運用計劃, 季間運用計劃, 月間運用計劃, 週間運用計劃 및 日間運用計劃 등 많은 運用計劃이 겹쳐서 처음으로 하루(1日)의 實際運用制御를 實施한다는 段階에 이르게 되는 것이며 그중의 어느 하나라도 疎忽히 할 수 없는 것이다. 이와 같이 아주 綿密한 計劃을 미리 作成해 두기 爲하여서는 Digital 計算機 또는 Analog 計算機가 缺세없이 活躍하게

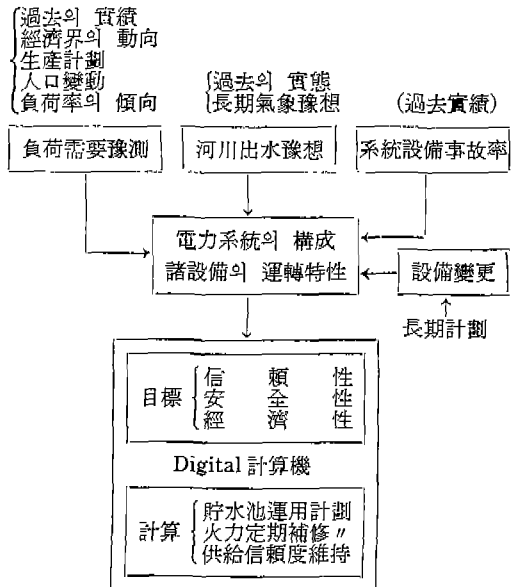
되는 것이다.

한편 이들의 諸計劃이 따로 따로 세워진다면 計劃을 세운 意味가 없고 諸計劃이 有機的으로 結合되어야만 할 것이다. 이것은 將來의 일이란 正確하게 알 수는 없기 때문이다. 豫測의 根本原理로서 豫測코자 하는 時點이 멀면 멀수록 豫測精度가 낮아지므로 考察의 對象이 되는 期間이 긴 計劃(長期: 年~月)을 생각할 경우에는 系統負荷나 河川出水 더 나아가서는 電源事故 등이 發生될 것이라는 경우를 確率的으로 把握하여 期待費用이 最少로 되는 運用의 大綱을 決定할 것을 目的으로 하는 것이다. 한편 考察의 對象期間이 짧은 計劃(短期: 月~日)에서는 上述한 系統負荷 및 河川出水가 比較的 높은 精度로 豫測되므로 確率을 導入하는 代身에 精度가 높은 豫測值을 使用하여 長期計劃에 合致되도록 運用計劃을 作成하게 되는 것이다.

다음에 이것을 좀 더 具體的으로 살펴 보겠다.

(1) 長期運用計劃

運用計劃의 大綱을 決定하는 長期運用計劃에서는 年間的 經濟運用計劃, 各設備(主로 火力發電設備)의 定期補修計劃 및 供給信賴度維持計劃 등을 總合하여 各月(또는 旬)의 水火力發電所 全體의 發電量, 貯水池 運用 등이 計劃된다. 이들 計劃은 計劃하지 않으면 안될 期間이 길기 때문에 確率의 要素가 包含



(圖 2-1) 長期運用計劃 作成에 必要한 data

되어 計劃作成에 極히 大量의 計算이 要求되므로 Digital 計算機의 힘을 빌리지 않을 수 없을 것이다.

다음에 電力系統의 諸設備의 運用을 計劃함에 있어서 考慮하지 않으면 안될 事項을 整理하면 圖 2-1에서 보는 바와 같이 될 것이다. 即 電力系統의 構成과 各 設備의 運轉特性을 把握하고 負荷需要를 豫想한 다음에 이것을 供給하기 爲하여 利用할 수 있는 河川出수가 어느 程度이며 利用할 수 있는 系統設備가 얼마만큼인가, 또 各 設備의 事故는 어느 程度 發生할 것인가를 考慮에 넣어 長期運用計劃을 세우게 되는 것이다.

이들 중에서 負荷需要豫想이 가장 어려워 同圖에서 보는 바와 같이 여러가지 要因을 考慮하여 決定하여야 하므로 이것이 計劃計算機械化의 一環으로서 반드시 處理하지 않으면 안될 큰 問題로 되고 있다.

다음에 長期運用計劃問題를 考察함에 있어서 特別히 注意하지 않으면 안될 事項으로서는 大略 다음과 같은 몇가지 點을 들 수 있다.

① 貯水池로의 流入量은 季節에 따라 크게 變動하므로 流入狀況을 正確하게 豫知한다는 것은 極히 어렵다.

② 系統負荷도 流入量과 마찬가지로 正確하게 豫知할 수 없다. 特別히 自流式 水力發電所의 出力은 流入量의 影響을 直接 받기 때문에 그 出力을 正確하게 把握할 수 없다.

한편 이들 自流式의 出力에 따라 調整能力을 가진 貯水池 및 調整池式 또는 揚水式의 各 水力發電所와 火力發電所의 各自가 分擔하여야 할 負荷가 決定되므로 經濟運用의 對象이 될 系統負荷 亦是 正確하게 잡을 수 없다.

③ 一般的으로 貯水池는 滿水位로부터 最低水位까지 變化하므로 그 水位變化에 따른 發電效率의 變化를 無視한다는 것은 許容되지 않는다. 이에 對하여 調整容量이 작은 調整池는 一定水位運轉을 한다고 볼 수 있을 것이다. 또 同一 河川上의 上下流 發電所 間의 流下時間은 考慮하지 않아도 좋을 것이다.

④ 火力發電設備에 있어서는 各 設備의 定期補修가 法規에 依하여 義務지워져 있으므로 時期에 따라 運轉할 수 있는 發電機 臺數가 달라진다. 따라서 發電機 combination 이 달라지므로 같은 負荷에 對하여서도 各 發電機의 運轉法 亦是 相異

하게 된다.

또 이때 各 時期에 있어서의 負荷率도 考慮할 必要가 있을 것이다.

이와 같은 定期補修時期를 가장 經濟的으로 되게끔 決定하는 問題도 長期經濟運用計劃에 있어서의 큰 問題로 되고 있다.

(2) 短期運用計劃

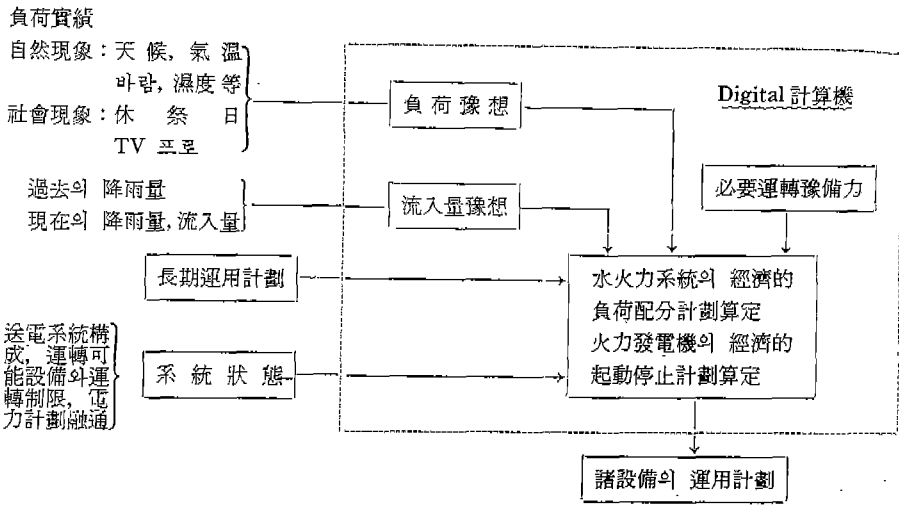
週間 또는 日間 程度를 考察期間으로 하는 短期運用計劃에서는 圖 2-2에서 보는 바와 같은 여러가지 要因을 考慮에 넣어야 한다. 먼저 考察期間內에서의 系統負荷 및 流入量을 豫想하고 考察期間內에서의 系統狀態를 알아가지고 앞서 세운 長期運用計劃에 合致되도록 水火力系統의 經濟的 負荷配分計劃 및 火力發電機의 經濟的 起動停止計劃 등이 運轉豫備를 考慮하면서 決定되어야 할 것이다.

이와 같이 決定된 短期運用計劃은 實際로 系統 諸設備을 運用하기 爲한 基準이 되는 것이며 또 이로부터 接續되고 있는 多數의 水力發電所 및 火力發電所의 運轉을 各 時刻마다 明示할 必要가 있을 것이다.

다음에 短期運用計劃의 決定에 있어서 알아 두지 않으면 안될 事項을 表 2-1에 表示한다. 各 發電所마다 이들 各 事項을 把握한 뒤에 各 時間마다(主로 한 時間마다) 各 發電所가 얼마만큼의 出力으로 運轉하여야만 될 것인가를 決定하여야 하는데 이것은 極히 複雜한 計算을 要하므로 Digital 計算機 또는 Analog 計算機의 活用이 重要視될 것이다.

(表 2-1) 短期運用計劃 決定에서 考慮하여야 할 諸特性

設 備	特 性 및 制 限
火力發電所	燃料費特性, 所內率特性, 出力上下限, 起動費特性, 最低再起動時間, 可能的 發電機並列 combination
水力發電所	貯水量과 有効落差의 關係, 貯水量 및 使用水量의 上下限, 發電機運轉特性, 出力上下限, 發電機 並列 또는 解列 rule, 上下流 發電所間의 물의 流下特性
送電系統	系統構成 및 送電損失
河 川	下流로의 放流特性

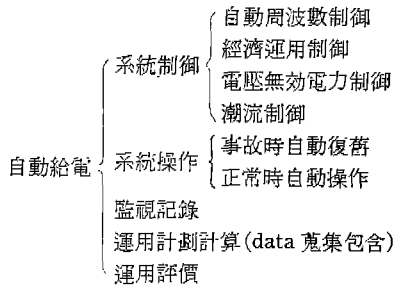


(圖 2-2) 短期運用計劃 決定에서 考慮할 諸要素

(3) 經濟運用制御

이것은 上記한 日間運用計劃에 따라 各 瞬間 瞬間의 運用을 經濟的으로 實施할 것을 目的으로 하는 것이다. 여기서는 系統의 經濟運用制御를 어떻게 實行할 것인가, 系統周波數制御와의 協調를 어떻게 取할 것인가, 그리고 流入量 및 負荷가 日間運用計劃을 算定했을 때의 크기와 相違될 때 이것을 어떻게 修正하여 運用할 것인가 하는 問題를 包含하게 된다.

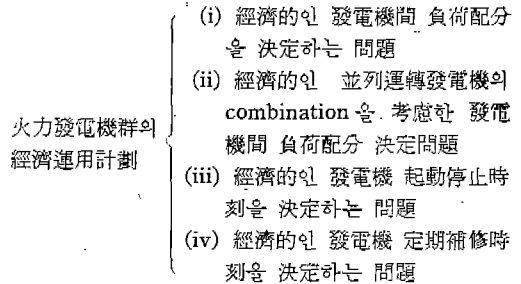
이 問題는 自動給電의 中核을 이루는 問題인데 그 概要만을 추리면 아래와 같다.



(圖 2-3) 自動給電의 體系

併用系統이므로 火力發電機群만의 經濟運用을 考慮한다는 것은 無意味하다고 생각될지 모르겠으나 水火力併用系統의 經濟運用計劃問題의 一部로서 반드시 火力發電機群의 經濟運用計劃을 檢討하지 않으면 안되는 것이며 또한 經濟運用計算手法의 基礎가 되는 것이므로 特히 여기서 이 問題에 簡單히 言及하고자 한다.

火力發電機群을 經濟的으로 運用하여 나가기 爲하여서는 아래에 列記하는 바와 같이 여러가지 問題가 있으나 本文에서는 其中 (i)에 限하여 具體的으로 說明하고 (ii)~(iv)의 問題에 對하여는 簡單히 그 概要만을 說明하기로 한다.



3. 火力發電機群의 經濟運用計劃

3-1 概 要

前述한 바와 같이 우리나라의 電力系統은 水火力

3-2 經濟的負荷配分問題

(A) 送電損失을 無視할 경우

本節에서 생각하는 問題는 經濟運用問題의 基本이 되는 것인데 問題의 定式化 및 解法은 다음과 같다.

即 問題는

“n臺의 火力發電機가 並列運轉하고 있을 때 系統負荷(G_R)에 電力을 供給하기 爲하여서는 各發電機出力(G_i)이 各各 얼마씩 分擔하면 全燃料費(F_T)가 가장 적게 될까? 이때의 各發電機出力 G_i ($i=1, 2, \dots, n$)를 決定하라”가 될 것이다.

이것을 定式化하면

$$G_R = G_1 + G_2 + \dots + G_n = \sum_{i=1}^n G_i \quad \text{需給바란스} \quad (3.2.1)$$

$$G_i \leq G_i \leq \bar{G}_i \quad \dots \dots \dots \text{出力上下限} \quad (3.2.2)$$

$$F_i = f_i(G_i) \quad \dots \dots \dots \text{燃料費特性} \quad (3.2.3)$$

$$F_T = \sum_{i=1}^n F_i \quad \dots \dots \dots \text{總燃料費} \quad (3.2.4)$$

따라서 (3.2.1)~(3.2.3)式과 같은 關係가 있을 때 (3.2.4)式으로 주어지는 F_T 를 最少로 하는 G_i ($i=1, 2, \dots, n$)를 決定하라”가 된다.

以上과 같은 條件付 極值問題는 다음과 같이 하여 풀 수 있을 것이다. 即 새로이 (3.2.5)式과 같은 判定函數(criterion function) ϕ 를 만든다.

$$\begin{aligned} \phi = & \sum_{i=1}^n f_i(G_i) - \lambda \left(\sum_{i=1}^n G_i - G_R \right) \\ & - \sum_{i=1}^n \mu_{\mu i} (G_i - \bar{G}_i + S_{\mu i}^2) \\ & - \sum_{i=1}^n \mu_{i i} (G_i - G_i + S_{i i}^2) \end{aligned} \quad (3.2.5)$$

但 $\lambda, \mu_{\mu i}, \mu_{i i}$: Lagrange 乘數

$S_{\mu i}, S_{i i}$: 出力上下限을 考慮하기 爲하여 導入한 새로운 變數

이 ϕ 를 最少로 하는 必要條件 및 充分條件을 求하기 爲하여서는 ϕ 를 各各 $G_i, S_{\mu i}, S_{i i}, \lambda, \mu_{\mu i}, \mu_{i i}$ 로써 偏微分한 것을 0으로 攄으로써 다음과 같은 關係式을 導出하면 될 것이다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \phi}{\partial G_i} = 0 & \rightarrow \frac{df_i(G_i)}{dG_i} - \lambda - \mu_{\mu i} + \mu_{i i} = 0 \\ \therefore \frac{df_i(G_i)}{dG_i} & = \lambda + \mu_{\mu i} - \mu_{i i} \end{aligned} \quad (3.2.6)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial S_{\mu i}} = 0 \rightarrow \mu_{\mu i} \cdot S_{\mu i} = 0 \quad (3.2.7)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial S_{i i}} = 0 \rightarrow \mu_{i i} \cdot S_{i i} = 0 \quad (3.2.8)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial \lambda} = 0 \rightarrow \sum_{i=1}^n G_i = G_R \quad (3.2.9)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial \mu_{\mu i}} = 0 \rightarrow S_{\mu i}^2 = \bar{G}_i - G_i \quad (3.2.10)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial \mu_{i i}} = 0 \rightarrow S_{i i}^2 = G_i - \bar{G}_i \quad (3.2.11)$$

(3.2.6)~(3.2.11)의 各式을 풀어 G_i 를 決定하는 關係式을 求할 수 있다. 即

$$(a) \quad \underline{G}_i \leq G_i \leq \bar{G}_i \text{ 일 경우} \quad \frac{df_i(G_i)}{dG_i} = \lambda \quad (3.2.12)$$

이것이 所謂 等增分費理論을 보인 것으로서 圖 3-2-1에 表示한 바와 같이 圖式的으로 求할 수 있다.

$$(b) \quad G_i \geq \bar{G}_i \text{ 일 경우} \quad \frac{df_i(G_i)}{dG_i} = \lambda + \mu_{\mu i} \quad (3.2.13)$$

$$(c) \quad G_i \leq \underline{G}_i \text{ 일 경우} \quad \frac{df_i(G_i)}{dG_i} = \lambda - \mu_{i i} \quad (3.2.14)$$

여기에서 $\mu_{\mu i}$ 및 $\mu_{i i}$ 는 未定이므로 이대로는 G_i 를 決定할 수가 없다.

物理的으로 보아 出力制限値를 넘을 수 없다는 것, 萬一 出力上限을 넘는 경우에는 (3.2.13)式에 보는 바와 같이 λ 보다 큰 $df_i(G_i)/dG_i$ 를, 反對로 出力下限 以下일 때는 (3.2.14)式에 보는 바와 같이 λ 보다 적은 $df_i(G_i)/dG_i$ 를 選擇하여야 한다는 兩式으로부터 圖式的으로는 圖 3-2-2에서 보는 바와 같이 $df_i(G_i)/dG_i$ 特性(實線)을 그려 놓으면 各發電機出力 G_i 는 結局 (3.2.12)式만을 생각하면 充分할 것이다.

또한 需給 balance를 維持하는 條件(3.2.9)을 滿足시키지 않으면 안되기 때문에 結局 送電損失을 無視할 경우의 火力發電機群의 經濟的 負荷配分 決定은

$$\frac{df_i(G_i)}{dG_i} = \lambda \quad (3.2.12)$$

$$i=1, 2, \dots, n$$

$$\sum_{i=1}^n G_i = G_R \quad (3.2.9)$$

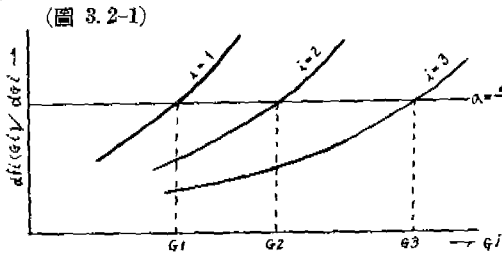
의 各式을 滿足시키는 G_i 및 λ 를 決定하는 問題가 된다.

(B) 送電損失을 包含시킬 경우

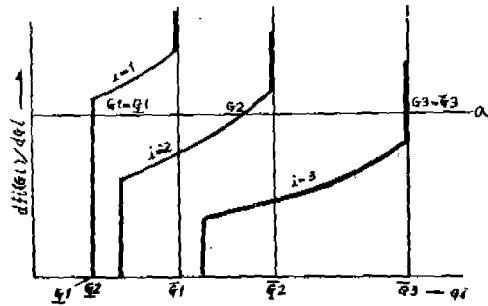
다음에 系統內의 送電損失을 考慮할 경우를 생각해 보겠다. 各發電機出力(G_i)의 函數로서 送電損失(P_L)이 表現된다고 하면 前記한 (3.2.1)式은 다음과 같이 될 것이다.

$$\sum_{i=1}^n G_i - P_L(G_1, G_2, \dots, G_n) - G_R \quad (3.2.15)$$

$$\text{但 } P_L = \sum_{m=1}^m \sum_{n=1}^n P_m B_{mn} P_n$$



(圖 3.2-2)



前述한 바와 똑 같은 手法로 다음의 關係를 얻을 수 있다. 即

$$\phi = \sum_{i=1}^n f_i(G_i) - \lambda \left(\sum_{i=1}^n G_i - P_L - G_R \right) - \sum_{i=1}^n \mu_{pi} (G_i - \bar{G}_i + S_{pi}^2) - \sum_{i=1}^n \mu_{ii} (G_i - \bar{G}_i + S_{ii}^2) \quad (3.2.16)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial G_i} = 0 \rightarrow \frac{\partial \sum_{i=1}^n f_i(G_i)}{\partial G_i} - \lambda \left(1 - \frac{\partial P_L}{\partial G_i} \right) = 0$$

$$\therefore \frac{df_i(G_i)}{dG_i} = \lambda \left(1 - \frac{\partial P_L}{\partial G_i} \right) \quad (3.2.17)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial \lambda} = 0 \rightarrow \sum_{i=1}^n G_i - P_L = G_R \quad (3.2.18)$$

(但 出力上下限 省略)

따라서 系統內의 送電損失을 考慮할 경우의 火力發電機群의 經濟的 負荷配分 決定問題는

$$\frac{df_i(G_i)}{dG_i} = \lambda \left(1 - \frac{\partial P_L}{\partial G_i} \right) \quad (3.2.17)$$

$$\sum_{i=1}^n G_i - P_L = G_R \quad (3.2.18)$$

의 兩式을 滿足시키는 G_i 및 λ 를 決定하는 問題가 된다.

여기서 (3.2.17)式은 協調方程式이라고 부르는 것이며 $df_i(G_i)/dG_i$ 는 增分燃料費, $\partial P_L/\partial G_i$ 는 增分

送電損이라고 부른다.

(3.2.17)式에서 $\frac{1}{1 - \frac{\partial P_L}{\partial G_i}}$ 를 penalty factor (L_i)

라고 하여

$$L_i \frac{df_i(G_i)}{dG_i} = \lambda \quad (3.2.17)$$

로 表現하는 경우가 많다.

以上 火力發電機群의 經濟負荷決定問題는 送電損失을 無視할 경우에는 各 發電機端에서의 增分燃料費 均等分擔條件을, 送電損失을 考慮할 경우에는 새로이 penalty factor를 導入하여 負荷端에 있어서의 增分燃料費에 置換시켜 이것을 各 發電機가 均等하게 分擔하도록 하면 되는 것이다.

(次號에 繼續)

◇ 電氣會館案內 ◇

1. 所在地 :

서울特別市中區水標洞11番地的 4 號

2. 規模 및 施設 :

- (1) 構造 鐵筋콘크리트造
- (2) 總建坪 728.53坪 (2,404.14m²)
- (3) 層數 地下 1層·地上 4層
- (4) 施設
 - ① 地下層.....茶房·理髮室·보일러室
·電氣室·宿直室·倉庫等
 - ② 1層.....展示場·事務室·警備室
 - ③ 2~3層.....事務室
 - ④ 4層.....講堂·圖書室(小會議室)
·事務室
 - ⑤ 屋上.....一部塔屋

3. 設計者 : 李喜泰 氏(李喜泰建築研究所 所長)

4. 施工者 : 現代建設株式會社

5. 施工期間 : 自 1966. 10. 1 至 1967. 7. 20

6. 總工事費 : 45,781,655원