

새로운 에너지 管理 戰略

으로서의 電力 負荷管理 (下)

Electric Power Load Management :
A New Energy Conseration Tactics

朴 永 文

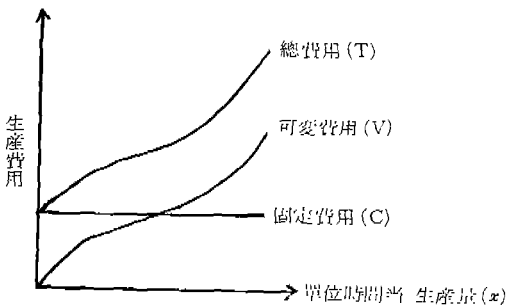
서울大學校 工科大學 教授

4. 限界費用의 概念

讀者의 便宜를 위하여 限界費用의 定義와 이 와 關聯된 基礎의 概念을 紹介하자면 다음과 같다.

即, 單位時間當 生産量 對 生産費用의 典型的인 費用曲線은 그림 1 과 같다.

그림 1에서 보는 바와같이 單位時間當 生産量 x 에 對한 總費用(total cost)을 $T(x)$ 라 하면 x 에서 dx 만큼 增産하는데 所要되는 總費用의 增加 $dT(x)$ 는



〈그림-1〉典型的 會社의 費用曲線

$dT(x) = [T의 x에 關한 導函數]dx \dots \dots (1)$
로 표시되며, 이 $dT(x)/dx$ 를 x 點에서의 限界費用 (marginal Lost)이라 定義한다. 따라서 限界費用은 現在의 生産量에서 單位生産量만큼 더 增産하는데 所要되는 總費用의 增加額 또는 增産分 單價라고도 할 수 있다.

한편, 平均 總費用 (average total cost), 即 x 를 生産하는데 所要되는 平均費用單價는 $T(x)/x$ 이다. 그런데 平均總費用을 最小로 하는 生産量 x 는

$$\frac{d}{dx} \left\{ \frac{T(x)}{x} \right\} = \frac{x \left\{ \frac{dT(x)}{dx} \right\} - T(x)}{x^2} = 0 \dots \dots (2)$$

$$\text{또는 } \frac{dT(x)}{dx} = \frac{T(x)}{x} \dots \dots (3)$$

의 條件부터 얻어지며, 式(3)은 限界費用과 平均總費用이 같을 때, 平均總費用이 最小가 됨을 알 수 있다.

또, 總費用 $T(x)$ 는 그림 1에 보는 바와 같이 可變費用 $V(x)$ 와 固定費用 C 의 和($T(x) = V(x) + C$)으로 이루어지므로

$$\frac{dT(x)}{dx} = \frac{x}{dx} \left\{ \frac{dV(x)}{dx} + C \right\} = \frac{dV(x)}{dx} \dots \dots (4)$$

의 關係가 成立하고, 따라서

$$\frac{dT(x)}{dx} = \frac{dV(x)}{dx} = \frac{T(x)}{x} \dots\dots\dots (5)$$

의 關係도 역시 成立한다.

그런데, 生産量의 增加에 따라 平均總費用 또는 平均可變費用 ($V(x)/x$)이 增加하면

$$\frac{x}{dx} \{ T(x)/x \} = \frac{x \{ dT(x)/dx \} - T(x)}{x^2} > 0 \dots\dots\dots (6)$$

또는

$$\frac{d}{dx} \{ V(x)/x \} = \frac{x \{ dV(x)/dx \} - V(x)}{x^2} > 0 \dots\dots\dots (7)$$

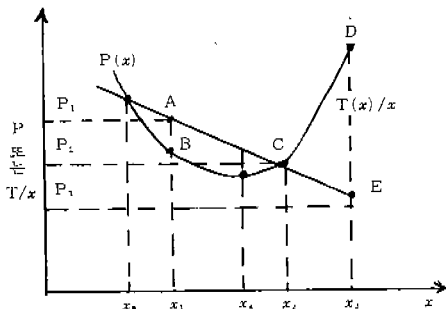
의 경우에 해당하므로,

$$\frac{dT(x)}{dx} > \frac{T(x)}{x} \dots\dots (8) \quad \text{또는} \quad \frac{dT(x)}{dx} =$$

$$\frac{dV(x)}{dx} > \frac{V(x)}{x} \dots\dots\dots (9)$$

가 되어, 限界費用은 平均總費用 또는 平均可變費用보다 크고, 反對로 生産量의 增加에 따라 平均總費用 또는 平均可變費用이 減少하면, 限界費用은 이들 費用보다 적어짐을 알 수 있다.

生産量 x 가 모두 消費 可能할 程度로 市場需要가 無限하다고 보면 式(5)의 條件이 充足될 때 平均總費用 即 生産單價가 最小가 되나, 實際로 完全한 自由競爭 市場에서는 市場價格 P 에 의하여 生産量 即 需要量이 平衡을 이루게 된다. 一般의 市場價格이 上昇할수록, 生産量 따라서 需要量이 減退하므로, 그림 2와 같은 曲線에 의하여 市場價格 P_1 에 의하여 生産量 x_1 , P_2 에 의하여 x_2 , P_3 에 의하여 x_3 가 決



(그림-2) 生産量 對 市場價格 및 平均總費用(生産單價)

定된다. 市場價格이 P_1 이면 單位生産量當 販賣利潤이 \overline{AB} (即 $P_1 - T(x)/x_1$), P_2 이면 無, P_3 이면 販賣損害가 \overline{DE} (即 $T(x_3)/x_3 - P_3$)이고 企業이 利潤을 가져올 수 있는 生産量의 範圍는 x_0 以上, x_3 以下이다. 따라서 企業이 維持되기 위해서는

$$P(x) > T(x)/x \dots\dots\dots (10)$$

이어야 하며, x 를 生産 또는 供給함으로써 얻어지는 企業利潤 R 은

$$R(P) = Px(P) - T(x(P)) \dots\dots\dots (11)$$

로서 주어지고, R 을 最大로 하는 市場價格 P 는

$$\frac{dR(P)}{dP} = P \frac{dx(P)}{dP} + x(P) - \frac{dT(x)}{dx} \frac{dx(P)}{dP} = 0 \dots\dots\dots (12)$$

의 條件을 充足시켜야 하므로, 式(12)로부터

$$P = \frac{dT(x)}{dx} \frac{dx(P)}{dx} \quad x \geq \frac{dT(x)}{dx} = \text{限界費用} \dots\dots\dots (13)$$

이며, 企業利潤을 最大로 하는 生産量 x 는 生産單價 $T(x)/x$ 를 最小로 하는 그림 2의 x_c 와 一致하지는 아니한다.

그런데, 만일 이 企業이 公共企業이어서 販賣價格 P 가 公共的인 觀點에서 (市場機能에서가 아님) P_c 로 統制된다면 $P(x) = P_c$ 의 關係로 주어지는 生産 또는 販賣量 $x = x_c$ 가 決定되나, 統制價格 P_c 는 보통 一定한 販賣利率 α 를 保障하는 線에서 即

$$(1 + \alpha) T(x)/x = P(x) \dots\dots\dots (14)$$

를 滿足시키는 $x = x_c$ 를 얻은後 $P_c = P(x_c)$ 를 決定하거나 또는 再投資를 위하여, 企業利潤 $R(P) = R_c$ 를 保障하는 線에서

$$\text{即 } R_c = Px(P) - T(x(P)) \dots\dots\dots (15)$$

를 滿足시키는 $P = P_c$ 를 決定하게 되는데, 後者에 의한 것이 보다 現實的이라 할 수 있다.

한편, n 時間(例를 들면 1日間)의 企業利潤 $\sum_{i=1}^n R_i(P_i)$ 을 一定의 程度로 保障할 때, 이 時間 동안의 總需要家 負擔 $\sum_{i=1}^n P_i x_i$ 를 最小로 하면 需要家에게 가장 有效하게 分配되는 셈이 되며, 그

러한 時間帶 販賣價格 P_i 는

$$\min_{P_i} \sum_{i=1}^n P_i X_i, \text{ 但 } \sum_{i=1}^n R_i(P_i) = \text{一定}$$

$$= \sum P_i X_i - \sum T_i \dots\dots\dots (16)$$

의 等式制約條件下에서 最適角度를 求하면 된다. 따라서 라그랑제 乘數 λ 을 導入하여

$$y(P_1, P_2, \dots, P_n) = \sum_{i=1}^n P_i X_i(P_i) + \lambda \left(\sum_{i=1}^n P_i X_i(P_i) - \sum_{i=1}^n T_i - C \right) \dots\dots\dots (17)$$

但, C : 常數 = $\sum_{i=1}^n R_i(P_i)$

$$\frac{\partial y}{\partial P_i} = \frac{d}{dP_i} \{ P_i X_i(P_i) \} + \lambda \left[\frac{d}{dP_i} \{ P_i X_i(P_i) \} - \frac{d}{dX_i} T_i(x) \frac{dX_i(P_i)}{dP_i} \right] = 0$$

의 條件으로부터

$$\frac{\frac{d}{dP_i} \{ P_i X_i(P_i) \} \frac{dP_i}{dX_i}}{\frac{dT_i(X_i)}{dX_i}} = \frac{\frac{d}{dX_i} \{ P_i(X_i) X_i \}}{\frac{dT_i(X_i)}{dX_i}}$$

$$= \frac{\lambda}{1 + \lambda} = \text{一定} \dots\dots\dots (18)$$

但 $i = 1, 2, \dots, n$

의 最適分配關係式을 얻을 수 있다. 式(18)에 의하면 各 時間對別 販賣價格 P_i 는 그 時間帶의 限界販賣額 $(P_i X_i)/dX_i$ 가 그 時間對의 限界費用 dT_i/dX_i 와 같도록 決定하는 것이 需要家 全體의 立場에서 볼 때 가장 有利하며, 따라서 販賣利益이 一定하므로 生産費用도 最小가 되어 窮極의 設備投資도 減少되거나 遲延시킬 수 있게 된다.

以上の 記述을 要約하건데, 自由競爭 市場에서 私企業이든, 價格統制의 支配를 받는 公企業이든 企業經營 目標을 最適하게 達成하기 위해서는 限界費用의 概念을 導入할 必要가 있고, 特히 時間帶別 電力料金制導入時 그 理論의 바탕과 料率決定은 바로 限界費用의 概念에서 出發하여야 할 것으로 본다.

5. 負荷管理을 위한 傳送, 制御 技術

負荷管理을 實施함에 있어, 이를 直接管理方

式에 의하던 또는 間接管理方式에 의하던 어떤 形態의 通信設備과 그 制御技術이 必要함은 勿論이다.

現在 널리 使用되고 있는 時間制御에 의한 스 위치나 미터 또는 一方向性 無線制御는 簡單하고 低廉한 技術이기는 하나, 負荷調整實施에 따른 融通性에 限度가 있다. 그런데 이 融通性은 特히 管理, 運營의 幅이 限定되어 있고 電力시스템에서는 매우 重要한 檢討對象이 되고 있음에 留意할 必要가 있다. 또 이 技術은 初期投資는 極히 적은 利點이 있는 反面, 技術의 進歩에 따라 그 機能을 改善하기가 容易하지 않고 欠點도 看過해서는 아니된다.

實用性이 높고, 보다 綜合的인 アプローチ(approach)가 期約되는 技術로서는 二方向性 狹帶域의 電力線搬送通信, 二方向性 廣帶域의 電力線搬送通信, 電話 및 이들의 組合을 들 수 있다 이들 가운데, 長期的 運用觀點에서는 뒤의 3種이 가장 將來性이 있는 것으로 보고 있다. 리플 制御시스템(ripple control system)과 같은 狹帶域시스템은 廣帶域電力線시스템이나 電話시스템에 가까운 將來에 大規模集積回路가 採用되어 價格이 低下되는 時期에는 競爭力이 喪失될 것으로 豫見되고 있다. 二方向性 無線시스템은 將來性은 가장 높은 反面, 아직 公表文獻上으로는 實用化를 위한 明白한 結論을 얻지 못하고 있는 實情이다.

6. 負荷管理가 容易한 負荷

時間帶別 料金制가 實施되는 경우, 需要家가 이에 有効하게 호응하거나 또는 電力會社가 直接 負荷를 制御함으로써 利益을 얻기 위해서는 負荷가 管理 또는 調整이 容易하여야 한다. 이 節에서는 住宅, 商業, 工業, 輸送部門에 있어서 負荷管理의 可能性이 높은 몇 種類의 負荷에 對하여 檢討해 보기로 한다.

負荷管理時의 主要目的은 電力需要의 時間的 移行과 電力消費의 節減이나, 이 日的이 負荷機器의 資本費輕減, 서어비스質의 向上등의 다른 日的과 相衡하는 경우가 많다.

따라서, 最良의 接近法은 이들 各目的을 서로 兼용한 最 現實的인 妥協案을 發見하는데 있으며, 그것은 多目的 最適化(multiobjective optimization)를 위한 客觀點인 시스템 接近法과 主觀的인 價格選擇의 雙方을 活用함으로써 비로소 可能하다.

A. 住宅 및 商業負荷

住宅 및 商業部門에 있어서 負荷管理에 의한 影響(impact)는 冷暖房과 溫水에 그 可能性이 가장 높다. 이미 歐州에서는 非尖頭 時間帶(主로 夜間)의 電力으로 加熱되는 大容量, 斷熱溫水히터가 널리 普及되어 왔으며, 그밖의 蓄熱, 冷暖房시스템도 商用化 되고 있다. 最近 美國에서도 이 方面에 對한 關心과 研究活動이 漸高하고 있다. 現在까지 蓄熱히터는 세라믹型 또는 加壓水型이 大部分인데, 住宅用의 小形에서 商業用의 大容量의 것이 商品으로 登場하고 있다.

百貨店 등의 商業빌딩, 商業部門에서는 近來 計算機에 의한 電力需給管理, 需要制御시스템을 導入하여, 節電에 成功한 事例가 많으며, 마이크로프로세서(microprocessor)의 出現에 힘입어 最近에는 - 一般家庭 등의 小口需要家에서도 負荷管理를 試圖하고 있는 實情이다.

需要家側에서의 計算機制御裝置의 活用은 앞으로 그業과 商業의 消費패턴의 改善은 勿論이고, 住宅의 消費패턴까지도 改善하게 될 것으로 豫測된다.

B. 工業負荷

總電氣에너지의 태반이 工業負荷에서 消費되므로, 工業負荷에 對한 負荷管理의 成功은 電氣에너지와 所要經費의 減節에 크게 寄與하게 될 것이다. 그러나, 여기에는 여러가지 問題를 內包하고 있어 그中 하나는 工業의 種別이 極히 多樣하고, 에너지消費特性이 훨씬 더 多種多樣하다는 點이다. 이를 克服하기 위해서 그동안 꾸준한 研究努力과 關心을 기울여 왔으며, 成功事例도 많이 報告되고 있다.

특히 歐州에서는 工業負荷의 管理에 對한 많은 經驗과 實績을 쌓고 있다. 한편 美國에서

는 비록 經驗은 日淺하나, 많은 工業需要家가 負荷管理의 對象이 될 수 있음을 認識하여 關心을 表明하고 있다.

C. 輸送負荷

電動車輛은 移動時 恒常 電力系統에 接續된 CEC(constant electric contact)車輛과 蓄電池를 실은 電氣自動車, 하이브리드(hybrid) 動力車 등처럼 一般的으로 系統에 接續되는 IEC(intermittent electric contact)車輛의 二部類로 分類되는데, IEC車輛에 對한 負荷管理의 可能性은 매우 높다고 보고 있으며, CEC車輛도 하드웨어와 運用計劃의 最適化에 의하여 負荷管理가 可能할 것으로 展望되고 있다.

現在로서는 電鐵, 地下鐵, 電氣自動車가 電力 에너지를 消費하는 分量이 全體的인 電力消費量과 比較할 때 尠소하나, 將次는 그 需要가 늘어날 추세에 있고, 어느 特定의 電力시스템의 있어서는 그 消費特性的 改善이 節電과 直結되므로, 이 方面에 對한 負荷管理의 成果를 過少 評價할 수 없을 것으로 보고 있다.

7. 負荷管理의 影響評價

負荷管理의 影響을 評價하기란 쉬운 일이 아니며, 先進各國에서는 그 潛在的인 費用, 便益評價에 관한 研究結果가 報告되고 있다. 그러나 全的으로 信賴할 程度의 評價基準은 아직 樹立되지 못하고 있는 實情이다. 參考的으로 近年 美國에서 試圖하고 있는 몇가지 研究動向을 아래에 紹介하기로 한다.

A. 經濟的 影響

負荷管理의 經濟的 影響과 關聯해서 基本的으로는 다음 4 種類의 類型이 있다.

1) 負荷의 直接管理에 立却한 戰略이 短期運用費用에 어떠한 影響을 주는가?

2) 負荷의 直接管理에 立却한 戰略이 系統擴充費에 어떠한 影響을 주는가?

3) 料金이라는 介存手段을 使用하여 管理하는 戰略이 短期運用費用에 어떠한 影響을 주는가?

4) 料金이라는 介在手段을 使用하여 管理하는 戰略이 系統擴充費에 어떠한 影響을 주는가?

위의 1) 및 2)型的 研究는 主로 特定の 電力 시스템에 對하여 파이로트프로젝트方式에 의하여 比較的 正確한 結論을 얻을 수 있으나, 3) 및 4)型的 研究는 需要의 長期時間的 料金彈性에 관한 데이터를 實驗的으로 얻기가 어렵고, 설명 얻었다 하더라도 그 非線型性, 有効性等이 如前히 問題點을 提示하고 있으므로, 엄밀한 解答은 將來의 研究에 依存할 수 밖에 없는 實情이다. 그러나 需要의 長時間 帶別價格 彈性에 관한 巨視經濟學의 概念을 無視하는 代身, 工學의 立場에서 본 經濟性의 檢討와 市場調查 經驗을 土 台로한 最終消費裝置에 對한 工學的 費用, 性能評價와 市場浸透性 評價方法은 이미 開發되고 있다.

Cilibert Associates 社는 住宅用 電氣器具의 여러 普及段階에 있어서의 美國의 電力系統이 받는 影響을 分析하여 이 方面 研究의 基礎를 닦았고, Brookhaven 國立研究所와 Westinghouse 社는 그 經濟的 影響評價에도 適用可能한 模型을 開發하였고, 그밖에도 Pensilvania 大學의 에너지센터, EEI 系統計劃委員會, System Control 社, Power Technology Inc. 社, Gordian Associates 社等에서도 研究結果가 續續 發表되고 있다.

B. 社會的 影響

負荷管理의 實施와 그것에 必要한 通信, 制御 技術의 導入은 에너지의 合理的 利用의 側面에서는 바람직하나, 한편으로는 否定的인 側面도 想像할 수 있다. 이를테면, 食事時間, TV 視聽 時間을 非尖頭時間帶로 移行시키는 등 生活패턴을 變更시키는 계기가 될 수도 있고, 에너지集約產業에서는 夜間從業員數가 增加하는 경우도 想像할 수 있다.

負荷管理가 완벽할 경우, 生活樣式의 變化보다 더욱 深刻한 局面을 假定할 수도 있다.

이를테면, 負荷管理体制下에 있는 病院, 消防, 治安施設이 意圖的인 不法行爲者에 의한 通信,

制御裝置의 惡用으로 機能停止될 수도 있고, 어느 特定 需要家가 故意的으로 서어비스 停止를 當할 수도 있다.

따라서, 負荷管理의 施行時에는 想定可能한 否定的 側面에 對하여 充分한 豫防措置가 講究되어야함은 勿論이다. 그 具體的 措置의 몇가지를 들자면 아래와 같다.

1) 適切한 에너지蓄積裝置, 電氣器具, 電氣設備의 開發에 의하여, 負荷管理가 大部分의 需要家의 生活樣式을 크게 變化하지 않도록 할 것

2) 意圖的 供給中斷, 私生活侵害, 시스템 惡用 등을 豫防하기 위하여 시스템設計, 負荷管理方式에 있어서 適切한 措置를 講究할 것. 이를테면, 需要家 消費데이터의 時間的集積, 데이터의 暗號化, 情報管理의 原則適用에 이 事項을 配慮할 것.

3) 時間帶別 料金制에 依하지 아니하는 直接管理方式에서는 供給側의 便宜에 따라 需要家의 電力購買量과 그 時期가 制限받고, 또 서어비스質이 制限될 可能性이 있으므로, 이에 對한 明確한 基準을 設定할 것.

8. 結 論

以上에서 負荷管理의 概念과 이에 關聯된 海外의 動向을 紹介하였는데, 에너지賦存 資源이 없는 우리나라의 實情으로서는 負荷管理体制의 確立과 이 方面의 研究가 緊要한 것으로 判斷된다. 이와 아울러 時間帶別 電氣料金制의 理論的 根據가 되는 限界費用에 對한 研究·檢討도 또한 着手, 進行되어야 할 것으로 본다.

參 考 文 獻

"Electric Power Load Management: Some Technical, Economic, Regulatory and Social Issues" by M. Granger Morgan, Sarosh N. Talukder for Invited Paper, Proceedings of the IEEE, Vol. 67, No. 2, February, 1979.