

電力系統運用的 最適化

— 차 —

머 리 말

- 1. 最適化의 基本方案
 - 1-1 電力系統의 構成 및 特徵
 - 1-2 電力系統運用目的과 最適化 方案
- 2. 電力系統의 運用理論

- 2-1 自動周波數制御
- 2-2 經濟運用制御
- 2-3 電壓·無効電力制御
- 3. 끝맺음

머리말

電氣事業者는 電氣使用者에게 良質의 電氣를 廉價로 供給할 것을 使命으로 하고, 이를 達成하기 위하여 電力系統의 計劃과 建設 및 運用面에 最適化를 圖謀하고 있다.

本稿에서는 電力系統運用面에서의 最適化 基本方案과 이미 開發된 一部の 運用理論을 紹介하여 會員들께 關心과 理解를 깊게 하고자 한다.

1. 最適化의 基本方案

1-1 電力系統의 構成 및 特徵

(1) 構成: 電力系統은 電力을 發生하는 水力發電所, 火力發電所 등의 發電設備과 이것을 輸送·分配하기 위한 送電線路, 變電所, 配電線路 등의 輸送設備 및 家庭이나 工場 등에서 電力을 消費하기 위한 需要設備로 構成되어 있다.

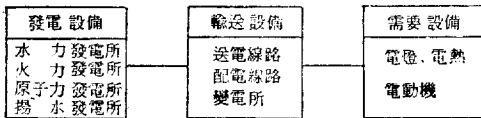


그림 1-1 電力系統의 構成圖

(2) 特徵: 電力系統을 全般的으로 보면 다음과 같은 特徵을 갖고 있다.

- (i) 電力의 發生과 消費는 同時에 이루어진다. 即, 電力의 形態로는 經濟的으로 大量을 貯藏할 수 없다.
- (ii) 電力需要는 季節的, 時間的, 瞬間的으로 變動한다.

- (iii) 同波數 및 電壓은 各各 有效電力 및 無効電力의 需給不平衡에 의하여 發生되는데, 周波數는 全系統的으로, 電壓은 局部的으로 變動한다.
- (iv) 電力系統은 外的要因과 內的要因에 의하여 事故의 發生이 不可避하다.
- (v) 電力系統은 恒常 成長·發展한다.
- (vi) 電力系統의 特性은 系統構成內容의 變化에 따라 變한다.

1-2 電力系統運用目的과 最適化方案

(1) 運用目的: 電力系統運用目的은 電氣事業의 使命을 運用面에서 達成하려는 것으로서 다음과 같은 意味를 갖는다.

- (i) 豊富(Quantity)한 電力의 供給
- (ii) 良質(Quality)의 電力供給
- (iii) 廉價(Economy)의 電力供給
- (iv) 安全(Safety)한 電力供給

(2) 最適化方案: 電力系統의 運用은 既設設備를 需給狀態, 貯水池의 出水狀況, 設備稼動狀態 등 環境의 變化에 對處시켜서, 運用目的을 達成하는 것이다. 即時時刻刻의 負荷變動에 對處되는 豫備力을 保有시켜, 負荷變動이 생겨도 周波數 및 電壓이 規定值에 維持되도록 하며, 出水의 狀況이나 發電所의 效率를 勘案하여 電力發生에 必要한 火力의 總燃料費를 最少로 運轉하는 것이다. 그러다가 일난 事故가 發生하면 迅速히 事故를 除去하여 事故의 波及·擴대를 防止하는 諸對策을 實施하여 電力의 安定供給에 努力하는 것이다. 그러기 위하여는 事前에 綿密한 運用計劃을 作成하고, 이것을 基礎로 한 運用制御를 할 必要가 있다. 그리고 이 境週 常時 系統의 狀態를 監視하여 狀況의 變動에 應하여 適切한 計劃의 變更를 하여야 한다. 또 運用實績을 評價하여 運用計劃과 運用制御에 反映되도록 한다.

* 正會員·韓電系統運用部次長
 ** " " " 給電計劃課長
 *** " " " " 代理

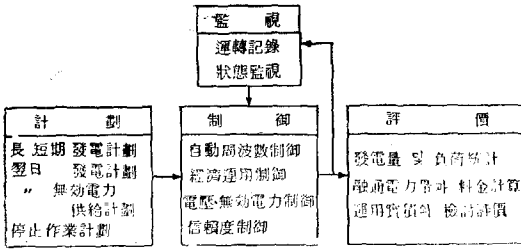


그림 1-2 系統運用最適化業務 흐름圖

2. 電力系統의 運用理論

2-1 自動周波數制御

(1) 制御方式; 自動周波數制御方式으로는 다음의 세 가지가 있다.

- (i) 定周波數制御(flat frequency control; FFC)
- (ii) 定連系統電力制御(flat tieline control; FTC)
- (iii) 周波數偏倚連系統電力制御(tieline frequency bias control; TBC)

連系統에서는 위와 같은 制御方式을 組合하여 使用하므로서 連系統電力 및 周波數를 規定値에 維持시킨다.

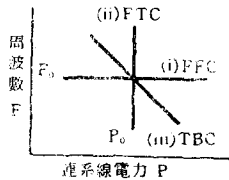


그림 2-1. 制御方式別 特性圖

(2) 制御理論; 두 系統 A 와 B가 連系統되어 並列運轉되고 있다면, 負荷變動 ΔL [MW]와 周波數變動 ΔF [Hz] 및 連系統電力變動量 ΔP_T [MW] 사이에는 需給均衡의 條件에서 다음

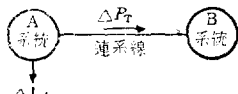


그림 2-2 모델系統圖

$$\left. \begin{aligned} \Delta L_A &= -(K_A \cdot \Delta F + \Delta P_T) \\ 0 &= -K_B \cdot \Delta F + \Delta P_T \end{aligned} \right\} \quad (2-1)$$

여기서 K_A 및 K_B ; A 및 B 系統의 系統定數[MW/Hz] 式(2-1)로부터

$$\left. \begin{aligned} \Delta F &= -\frac{\Delta L_A}{K_A + K_B} \\ \Delta P_T &= K_B \cdot \Delta F = -\Delta L_A \frac{K_B}{K_A + K_B} \end{aligned} \right\} \quad (2-2)$$

가 成立된다.

(3) 制御分擔; 電力 系統의 變動負荷는 周期가 긴 것일수록 變動幅이 큰 性質이 있는데, 이것까지 自動周波數制御에 의한 때에는 經濟性의 면에서 問題

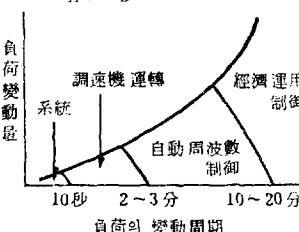


그림 2-3. 變動負荷의 制御分擔

가 있으므로 後述하는 經濟運用制御(economic load dispatch control; EDC)와 그림 2-3과 같이 制御를 分擔한다.

2-2. 經濟運用制御

(1) 火力發電所出力의 經濟配分; n 臺의 火力發電機가 있을 境遇에 各出力을 $P_{S1}, P_{S2}, \dots, P_{Sn}$ [MW], 各各의 燃料費를 $f_1(P_{S1}), f_2(P_{S2}), \dots, f_n(P_{Sn})$ [원/MWH]로서 出力의 函數로 表示하고, 系統의 負荷를 P_R [MW], 送電損을 P_L [MW]로 하면, 需給均衡의 條件으로부터

$$P_R = P_{S1} + P_{S2} + \dots + P_{Sn} - P_L \quad (2-3)$$

가 成立하고, 이때의 系統의 總燃料費는

$$\begin{aligned} F &= F_1 + F_2 + \dots + F_n \\ &= f_1(P_{S1}) + f_2(P_{S2}) + \dots + f_n(P_{Sn}) \end{aligned} \quad (2-4)$$

로 된다. 經濟運用的 問題는 式(2-3)의 條件에서 式(2-4)의 値가 最少로 되는 P_{Si} ($i=1 \sim n$)를 求하면 된다. 이것을 풀려면 Lagrange의 未定係數 λ 를 써서

$$\phi = F - \lambda(P_{S1} + P_{S2} + \dots + P_{Sn} - P_L - P_R) \quad (2-5)$$

로 놓고, 微分法에 의하여 $\frac{d\phi}{dP_{Si}} = 0$ ($i=1 \sim n$)로 하여 다음의 關係式이 얻어진다.

$$\frac{dF_1}{dP_{S1}} L_1 = \frac{dF_2}{dP_{S2}} L_2 = \dots = \frac{dF_n}{dP_{Sn}} L_n = \lambda \quad (2-6)$$

$$\text{여기서 } L_i = \frac{1}{1 - \frac{\partial P_L}{\partial P_{Si}}} \quad (i=1 \sim n)$$

$$P_L = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n P_i B_{ij} B_j$$

B_{ij} 는 系統의 狀態에서 定해지는 定數

式(2-6)이 火力發電所의 經濟運用力를 表示하는 基本式으로서 火力發電所의 協調方程式(coordination equation)이라고 부른다. 이러한 負荷配分法을 等增分燃料費의 法則(law of equal incremental fuel cost)이라고 한다. 그리고 λ 는

最經濟的인 運轉狀態에 있어서 系統의 增分費用을 意味하고, 式(2-5)가 滿足되도록 選定한다. 또 L_i 는 i 發電所의 增分送電 效率의 逆數로서 페널티係數(penalty factor)라고 부른다.

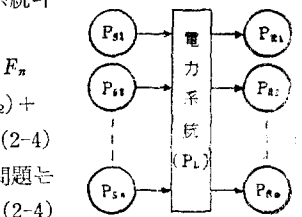


그림 2-4. 火力系統圖

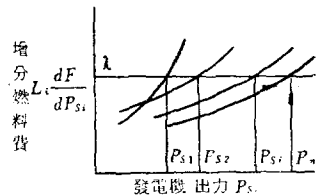


그림 2-5 等增分燃料費에 의한 發電機出力의 配分

(2) 水·火力系統의 經濟運用; 水力發電所의 運用은 貯水池運用條件 등 考慮하여야 할 要素가 많지만, 여기서는 說明을 簡單히 하기 위하여 落差는 一定으로 하고, 其他의 諸條件은 無視하는 것으로 한다. 卽어느 一定期間에 있어서의 發電所의 使用水量이 定하여져 있을 때(使用水量은 年間の 運用計劃을 修正한 短期運用計劃에 의하여 經濟的 見地에서 定하여진다), 주어진 負荷에 對하여 各發電所가 어느 程度의 出力으로 運轉되면 그 期間內에 있어서 火力發電所의 燃料費가 最少로 될까에 對하여 생각한다.

簡單히 하기 위하여 그림 2-6 처럼 水力發電所와 火力發電所가 各各 1個所로 構成되어 있는 것으로 하고, 水力發電所의 使用水量 및 出力을 $Q[m^3]$, $P_h[MW]$, 對象期間 T 에 있어서 規定

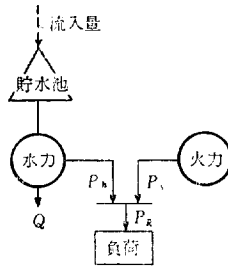


그림 2-6 水火力系統圖

使用水量을 $Wm[m^3]$ 로 하면, 需給均衡의 條件으로부터

$$P_R = P_S + P_h - P_L \quad (2-7)$$

이 成立하고, 規定使用水量의 條件에서

$$W = \int_0^T Q dt \quad (2-8)$$

가 成立한다. 이때의 總燃料費는

$$F_T = \int_0^T f(P_S) dt \quad (2-9)$$

이다. 이것을 最少로 하는 P_h 및 P_s 를 求하는 것으로서 이 解는 變分法을 適用하여 다음과 같은 結果를 얻는다.

$$\left. \begin{aligned} \lambda \frac{dF}{dP_S} - L_s &= \lambda & (\text{火力機}) \\ \lambda \frac{dQ}{dP_h} - L_h &= \lambda & (\text{水力機}) \end{aligned} \right\} \quad (2-10)$$

上式에서 λ 는 對象期間中 規定使用水量이 一定이라는 條件을 滿足시키도록 選定되는 Lagrange 定數로서 물의 增分單價(incremental water cost) 또는 물의 增分價値(incremental water value)라고 부른다. 兩式을 比較하면 dF 와 $d(Q)$ 가 對應되며, 이것으로부터 水力發電所를 等價한 火力發電所로 보아 運轉할 수 있다. 式(2-10)을 水·火力系統의 協調方程式(coordination equation of hydro-thermal system)이라고 부른다.

2-3 電壓·無效電力制御

(1) 制御方式; 電壓·無效電力의 制御目的은 各地点의 電壓을 恒常 基準値에 維持시키고, 送電損失을

輕減시키려는 데에 있다. 그러기 위하여는 電壓이 各地点마다 變하는 特性을 考慮하여 系統內의 主要地点에 基準値를 設定하고 그것을 地區別로 維持하도록 하는 地區別制御方式과 廣範한 地域에 걸친 系統을 一括하여 自動制御하는 集中制御方式 등이 있다. 一般으로 루프系統(loop system)을 構成하는 基幹系統처럼 各地區間의 關係가 密接하여 電壓·無效電力制御機器의 動作이 他地區에 複雜한 影響을 주는 境遇에는 集中制御方式이 適合하고, 放射狀構成의 局地系統처럼 他地區와의 相互作用이 比較的 작은 系統에서는 地區別制御方式이 適合하다.

(2) 制御特性; 簡單히 하기 위하여 送電線路의 靜電容量을 無視하면 送受兩端의 電壓과 有效 및 無效電力潮流와의 關係는 다음과 같이 表示한다.

$$(E_S - E_R) E_R \approx P \cdot r + Q \cdot x \quad (2-11)$$

여기서 E_S ; 送電端電壓[KV]

E_R ; 受電端電壓[KV]

P 受電端有效電力潮流[MW]

Q ; 受電端運相無效電力潮流[Mvar]

r 및 x ; 線路의 抵抗 및 리액턴스[Ω]

따라서 送電端電壓一定의 境遇 有效電力 또는 無效電力이 變動되면, 受電端電壓의 變動은 式(2-11)로부터 다음과 같이 된다.

$$\left. \begin{aligned} \Delta E_P &= \left(\frac{\partial E_R}{\partial P} \right) \Delta P \approx - \frac{r}{2E_r - E_S} \Delta P \\ \Delta E_Q &= \left(\frac{\partial E_R}{\partial Q} \right) \Delta Q \approx - \frac{x}{2E_r - E_S} \Delta Q \end{aligned} \right\} \quad (2-12)$$

一般으로 送電線路의 리액턴스 x 는 抵抗 r 에 比하여 큰 값을 갖기 때문에 受電端電壓變動에 對하여 無效電力 쪽이 有效電力에 比하여 큰 影響을 준다.

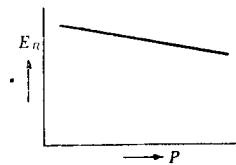


그림 2-7 有效電力—電壓特性

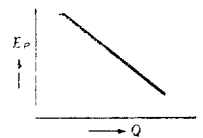


그림 2-8 無效電力—電壓特性

(3) 制御의 例; 集中制御方式을 例로 하여 說明한다. 이 방식의 基本條件은

(i) 系統內의 必要地点의 電壓을 미리 定해진 許容變動內에 집어 넣을 것.

(ii) 電壓·無效電力을 制御하는 操作機器(發電機, 調相設備, 負荷時 탭切替器 등)의 狀態를 運轉 가능한 範圍에 集어 넣을 것.

(iii) 制御對象系統内の 全送電損失이 最小로 되도록 할 것.

틀이다. 이러한 關係를 式으로 表現하면 다음과 같다.

$$|E_{di}| = E_{oi} + \Delta E_i$$

$$= |E_{oi} + \sum_{j=1}^J A_{ij} \Delta X_j| \leq E_i \quad (2-13)$$

$$\bar{X}_j \geq X_j + \Delta X_j \geq \underline{X}_j \quad (2-14)$$

$$L = \sum_{k=1}^K 3 \cdot I_k^2 R_k$$

$$= \sum_{k=1}^K \left\{ \frac{P_k^2 + (Q_k + B_{kj} \Delta X_j)^2}{(E_k + A_{kj} \Delta X_j)^2} \right\} R_k \rightarrow \min \quad (2-15)$$

여기서 E_{di} : 機器操作後의 i 地点의 電壓目標值로부터의 偏差 [KV]

E_{oi} : 機器操作前의 i 地點의 電壓目標值로부터의 偏差 [KV]

ΔE_i : 機器操作에 의한 i 地點의 電壓變動量 [KV]

E_i : i 地點의 許容偏差 [KV]

A_{ij} : j 操作機器를 單位操作하였을 때의 i 地點의 電壓變動量 [KV/Tap 또는 KV/MVar]

X_j 및 ΔX_j : j 操作機器의 操作前值 및 操作量

\bar{X}_j 및 \underline{X}_j : " 上限值 및 下限值

J : 全送電損失 [MW]

I_k : k 送電線의 電流 [A]

R_k : " 抵抗 [Ω]

P_k : " 有效電力 [MW]

Q_k : " 無效電力 [MVar]

E_k : " 電壓 [KV]

B_{ij} : j 操作機器를 單位量 操作했을 때의 k 送電線의 無效電力變動量 [KVar/Tap 또는 KVar/Kvar]

(i)의 條件, 即 被制御地點의 電壓을 許容範圍內에 들어넣을 境遇, 多數의 操作機器中에서 各個所의 目標電壓으로부터의 偏差를 줄이는데 가장 效果가 큰 機器를 選擇하기 위하여 다음과 같은 判定函數 F 를 最小로 하는 機器를 選定한다.

$$F = \sum_{i=1}^I (E_{di}/E_i)^2$$

위의 判定函數 F 를 最小로 하는 機器를 選定하기 위하여는 F 를 操作機器의 操作量으로 偏微分한 值 $\partial F/\partial \Delta X_j$ 를 모든 機器에 對하여 計算한다.

$$\frac{\partial F}{\partial \Delta X_j} = \sum_{i=1}^I \left(\frac{2E_{di} \cdot A_{ij}}{E_i^2} \right) \sim \sum_{i=1}^I \left(\frac{2\Delta E_{di} \cdot A_{ij}}{E_i^2} \right)$$

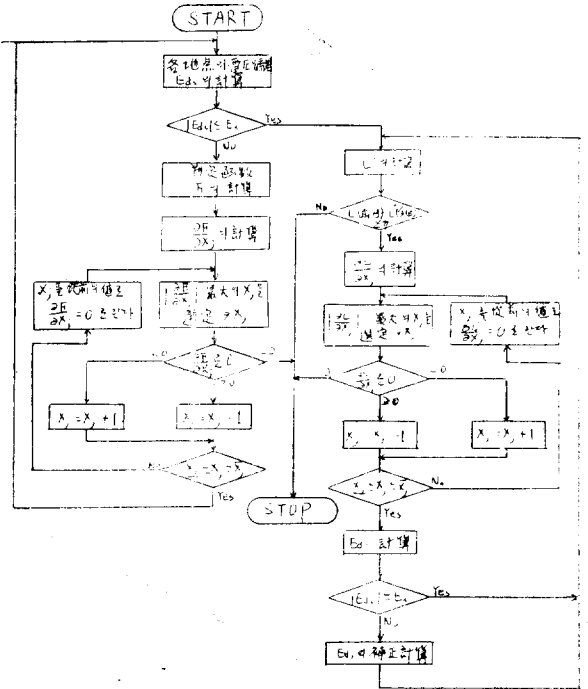


그림 2-9 電壓·無效電力의 集中自動制御 흐름圖

全被制御地點의 電壓이 許容偏差內에 들 때까지 F 의 값이 큰 機器부터 (ii)의 制限範圍內에서 1單位만큼씩 操作하기를 反復한다.

다음에 (iii)의 條件 即 送電損失을 最小로 하는 計算을 한다. 이 境遇에도 (i) 및 (ii)의 條件을 滿足시켜야 하므로 操作機器의 選擇方法은 前述한 電壓計算의 境遇와 같은 모양으로 한다.

3. 끝맺음

그 동안 電力系統運用的 最適化에 對하여는 自動周波數制御(AFC), 經濟運用制御(EDC), 電壓·無效電力制御(VQC) 등 個別的으로 進行되어 왔으나, 最近 電力計算機와 그의 應用技術의 飛躍的 發展에 따라 制御用電子計算機를 利用하여, 이들을 一貫的·綜合的으로 最適化해나가는 이른바 給電運用的 綜合自動化가 銳意 推進되고 있다. 그리고 制御對象業務로 信賴度制御까지도 試圖되고 있다. 이에 隨伴하여 最適化 理論의 開發도 綜合自動化를 前提로 한 새로운 推進段階에 들어섰다.

이러한 實情에 이르러 于先 電力系統運用的 最適化 基本方案과 一部運用理論을 紹介하였으나 이것은 이미

< p.20에 계속 >