

電力系統의 階層制御研究*

劉 錫 九

電氣 및 電子工學科

(1980. 12. 1 접수)

〈要 約〉

大規模電力系統의 最適制御問題는 莫大한 量의 複雜한 計算을 要求하고 있으며, 실제로 많은 問題가 計算機의 能力을 초월하는 경우가 있다.

電力系統의 制御시스템은 本質的으로 階層構造로 되어 있으므로 시스템 制御에 階層制御를 適用하는 것이 問題解決에 보다 効果的이라 하겠다.

따라서 本論文은 電力系統의 階層構造와 階層制御理論에 대하여 記述하였으며, 電力系統의 運用 및 制御에 가장 基礎가 되는 系統特性定數를 系統分割時에 効果적으로 計算할 수 있는 algorithm을 提示하고, 計算例로서 모델 系統에 適用하였다.

Multi-level Control of Power System*

Seok Ku You

Dept. of Electrical and Electronic Eng.

(Received December 1, 1980)

〈Abstract〉

The optimization problems of large scale power system require large amounts of calculation, and for many problems of practical interest the computations required surpass the capabilities of a single computer

As the control system essentially consist of hierarchical structure, multilevel approach is benifit to get around this difficulty.

This paper describes how multilevel hierarchical concepts and techniques can be applied in the optimal control of power system and presents an algorithm of calculating the system characteristic constants through decomposition. The numerical example for model system is presented here.

I. 序 論

電力系統의 制御는 大體하여, 集中制御와 分散制御가 있다.

集中制御는 系統內에서 측정된 데이터를 中央給電指令所에 傳送하고, 中央給電指令所에서는 最適解를 결정하여 系統內 各所에 制御指令을 傳送한다.

이 制御方法은 전체적인 網에서 制御를 실행하므로, 制御機器間의 相互作用을 고려한 最適値를 결

정할 수 있다.

그러나 많은 情報傳送과 計算機의 記憶容量을 필요로 하는 동시에, 計算機의 演算時間이 길어지는 결점이 있다.^{(1), (6)}

한편, 分散制御는 系統을 몇개의 서브시스템(subsystem)으로 분할하고, 분할된 서브시스템은 자체내의 計算機를 사용하여, 독자적으로 計算 및 制御를 실행하는 것이다. 이 制御方法은 集中制御가 가지는 결점을 해소하지만 서브시스템의 상호작용이 매우 적은 경우를 제외하고는 全系統에서 불

*이 논문은 1980年度 문교부 학술연구 조성비에 의하여 연구된 것임.

에 바람직한 결과를 기대할 수 없다. (1), (6)

앞으로 電力系統이 대규모로 복잡화 될 경우, 현재 실시하고 있는 集中制御方式으로는 어려운 점이 때때로 야기될 것이므로, 대규모 電力系統에서는 새로운 制御方式이 요망되고 있다.

따라서 本 論文에서는 대규모 전력계통을 몇개의 서브시스템으로 분할하여 分散制御를 실시하되, 각 서브시스템의 最適解가 系統 全體에서 본 最適解와 일치되게끔 하는 階層制御方法에 대하여 研究하였으며 電力系統의 最適制御에 기초가 되는 感度定數를 系統分割時에 효과적으로 計算할 수 있는 algori-

them을 제시하였다.

또한 提示된 algorithm을 모델系統에 적용하고, 그 結果에 대하여 기술하였다.

II. 電力系統의 階層構造와 制御시스템

電力系統의 制御시스템은 본질적으로 그림 2-1과 같이 階層構造로 되어 있으며, 온-라인 階層시스템의 分解方法은 다음과 같이 3종류로 대별할 수 있다. (1), (4), (6)

(1) Layer, ……制御레벨을 기준으로 한 分割.

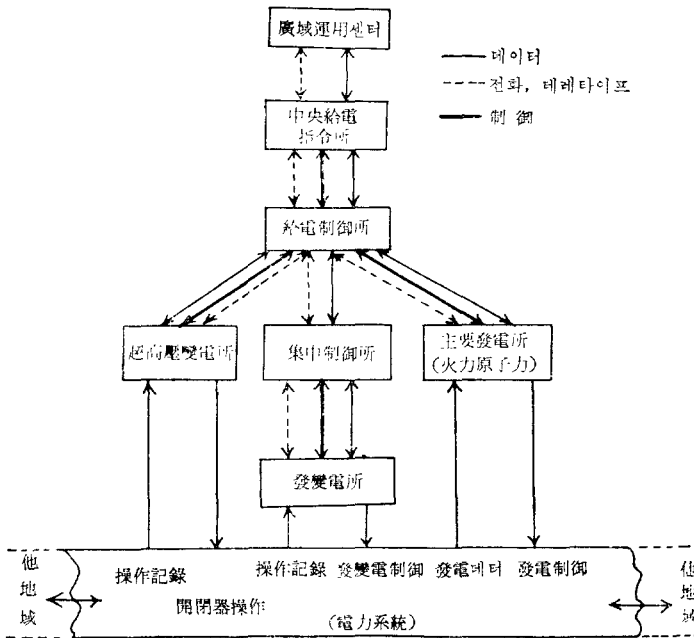


그림 2-1. 電力系統의 階層構造

시스템의 制御문제를 制御레벨로 구별하여 그림 2-2와 같이 直接制御 Layer, 最適制御 Layer, 適應制御Layer, 自己組織化 Layer로 分割한다.

電力系統에서의 直接 制御 Layer는 局地的인 情報를 이용하여 간단한 理論判斷에 의해서 高速制御를 시행하는 것으로, 保護繼電器 또는 各種 系統制御裝置 (AVR, AQR, 再閉路裝置, 變電所自動復舊裝置等)이 이에 屬한다.

最適制御 Layer는 電力系統의 狀態를 파악하여, 上位의 適應制御에서 設定한 조건을 토대로 最適化를 시행하고, 그 結果를 下位의 直接制御 Layer에

전달한다. 適應制御 Layer는 電力系統의 環境(天候, 社會行事 等)과 電力系統의 상황(事故發生의 有無, 電力需給의 상황, 送電系統의 구성 등)을 기초로 系統狀態를 파악, 평가하여 系統을 制御한다.

自己組織化 Layer는 制御系의 設計方針 등이 이에 속한다.

(2) Strata……記述方法의 相異에 의한 層別化 같은 시스템을 相異한 記述方法(Modeling의 方法)으로 모델化 할 때, 각 모델에 대응하는 시스템은 多層 구조를 형성하며, 이에 各層을 특히 Stratum이라 부른다. 電力系統에서는 3개의 Stratum

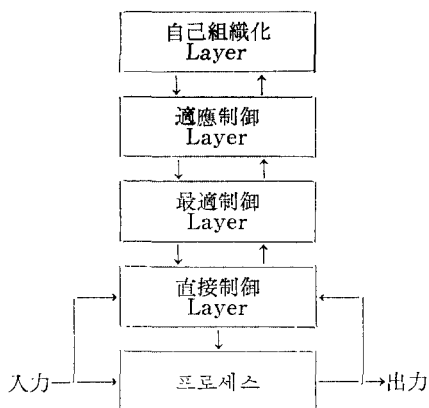


그림 2-2. 制御레벨을 기초로 한 分割

으로 나눌 수 있으며, Stratum 1은 電力에너지의 發生, 傳送, 消費 등 物理的 프로세스로서 電氣理論, 熱力學에 기초를 둔 모델이 사용된다.

Stratum 2는 各種 最適化 및 系統감시를 포함한 情報處理과 系統制御가 중심이 된다. Stratum 3은 經濟的 要素를 중심으로 한 經營 레벨이 될 수 있다.

(3) Echelons……組織階層의 層別化

시스템을 구성하고 있는 서브시스템이 몇개의 相互作用을 가지며, 그 경계가 명확히 구별되고, 그 중 몇개의 서브시스템은 意思決定機能을 가지면서 階層을 구성하고 있을 때, 이 시스템의 各 階層레벨을 특히 Echelon이라 부른다.

이와 같은 시스템의 특징은 Echelon의 서브시스템 間에도 相互作用이 있으며, 시스템이 水平 Echelon으로 分割되는 同時에 垂直方向으로도 分割되는 것이다. 이 階層시스템은 시스템 전체를 구성하고 있는 各 유닛의 복잡성을 低減하며, 시스템 全體에 대한 外亂의 영향을 最小로 억제하기 때문에, 가장 보편적으로 다루는 方法이다.⁽¹⁾

현재 電力會社가 指向하고 있는 系統制御시스템은 Multi-Echelon 形의 階層시스템으로, 系統內에서 局地的인 情報만으로 判斷操作이 가능한 直接制御는 下位레벨의 計算機로 처리하고(예를 들면 基幹系統의 操作, 事故波及의 自動操作, 復舊操作 등) 全體의인 制御는 上位레벨의 計算機가 처리하도록 한다.

電力系統이 本質的으로 階層構造로 되어 있으므로, 階層制御理論의 立場에서 보면 問題解析이 매우 複雜하나, 大規模電力系統에서 階層制御를 실시

하면, 그 效果가 클 것으로 간주된다.

Ⅲ. 階層시스템의 協調原理와 最適制御

電力系統의 最適制御問題는 數理計算法의 問題로 定式化 된다.

全系統의 數理計劃問題를 몇개의 獨立된 서브시스템의 問題로 分解하고, 서브시스템의 獨立된 問題를 풀이할 때, 協調理論을 適用하여, 全體시스템의 最適條件을 만족시키도록 하는 階層시스템의 最適制御에 관하여 기술한다.^{(1), (4), (6)}

階層시스템의 最適制御는 協調變數라 불리는 서브시스템 內의 어떤 變數나 파라미터가 제 2레벨의 컨트롤러에 의해서 조작되는 것처럼 생각함으로써 이루어진다.

한편, 컨트롤러의 역할은 독립된 제 1레벨에서, 전체 시스템의 最適條件에 대응하는 解를 선정하도록 協調變數를 조정하는 것이다.

따라서 階層시스템의 最適制御問題는 두개의 스텝을 거쳐 해결된다. 즉,

제 1스텝은 綜合問題(評價函數와 拘束條件)을 各自 다른 역할을 갖는 2개의 레벨(일반적으로 多重레벨)의 형식으로 개조하는 것이다.

제 2스텝은 서로 相互作用이 미치지 않는 部分으로, 제 1레벨의 역할 또는 문제를 分割하는 것이다.

어떠 拘束條件을 가진 最適化問題를 multi-level 문제로 變換하는 方法은 여러가지가 있겠으나, 本質的으로 모델協法(實行可能法)과 目的協調法(雙對實行可能法)으로 大別할 수 있으며, 이들 解法에 대하여 기술하면 다음과 같다.

1. 모델協調法

그림 3-1과 같은 시스템에 관하여 綜合最適制御問題를 고찰하여 본다. 시스템의 變數를 다음과 같이 정의한다.

- m : 操作變數 벡터
- m' : 서브시스템 i 의 操作變數 벡터
- y : 시스템의 出力變數 벡터
- y' : 서브시스템 i 의 出力變數 벡터
- x^1 : 서브시스템 1에서 서브시스템 2에 대한 相互作用 變數 벡터
- x^2 : 서브시스템 2에서 서브시스템 1에 대한 相互作用 變數 벡터

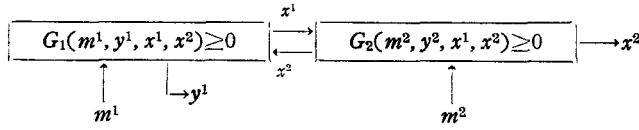


그림 3-1. 結合시스템

시스템 方程式을

$$G(m, y, x) \geq 0 \quad (3-1)$$

라 하고, 各各의 서브시스템에 대하여

$$G^i(m^i, y^i, x^1, x^2) \geq 0, \quad i=1,2 \quad (3-2)$$

라 한다. 또 最小化하려는 目的函數를

$$P(m, y, x) = P_1(m^1, y^1, x^1) + P_2(m^2, y^2, x^2) \quad (3-3)$$

라고 한다.

即 全시스템의 目的函數와 拘束條件을 서브시스템에 關係서 分離할 수 있다. 시스템의 綜合問題는

$$m, y, x \in \{m, y, x | G(m, y, x) \geq 0\} \quad (3-4)$$

이 되는 條件下에서

$$\min_{m, y, x} P(m, y, x) \quad (3-5)$$

를 實行하는 것이다. 식 (3-3)의 서브시스템의 目的函數는, 相互作用變數 x 가 포함되어 있다. 모델 協調法은 綜合最適化問題의 相互變數를 固定하므로써, 2개의 레벨問題로 變換하는 것이다.

즉, 相互作用變數를 어떤 값, 例를 들면 α 로 拘束한다.

$$x = \alpha \quad (3-6)$$

이와 같이 하면, 相互作用 豫測原理를 適用하므로써, 綜合問題는 다음과 같이 제 1 레벨과 제 2 레벨의 問題로 分解할 수 있다.

第 1 레벨 問題

$$G(m, y, \alpha) \geq 0 \quad (3-7)$$

의 條件下에서

$$H(\alpha) = \min_{m, y} P(m, y, \alpha) \quad (3-8)$$

를 決定한다.

第 2 레벨 問題

$$\min_{\alpha} H(\alpha) \quad (3-9)$$

를 實行한다.

즉, x 를 定數 α 로 놓으면, 제 1 레벨은 目的函數가 最小로 되는 變數 m, y 를 選定한다. 이때, 拘束條件은 주어진 α 에 대하여 滿足되어야 한다.

實際는 이들 2개의 레벨問題의 解法은 同時에 풀이되는 경우는 적으며, 반복계산을 實行하므로써 그 解를 求할 수 있다. 즉 第 2 레벨에서는 相互作用變數의 最適值가 되는 x_{opt} 의 α 를 推定하는 것이며, $x = \alpha$ 로 가정되면, 이 推定值를 第 1 레벨의 유닛트에 보내고, 第 1 레벨에서는 m 와 y 의 最適值를 決定한다. 逆으로, 이번에는 第 1 레벨의 유닛트는 第 2 레벨의 유닛트에 m 와 y 의 값을 보내면, 第 2 레벨의 유닛트에서는 보다 良好한 相互作用變數의 값을 推定한다. 이 過程을 圖示하면 그림 3-2와 같다

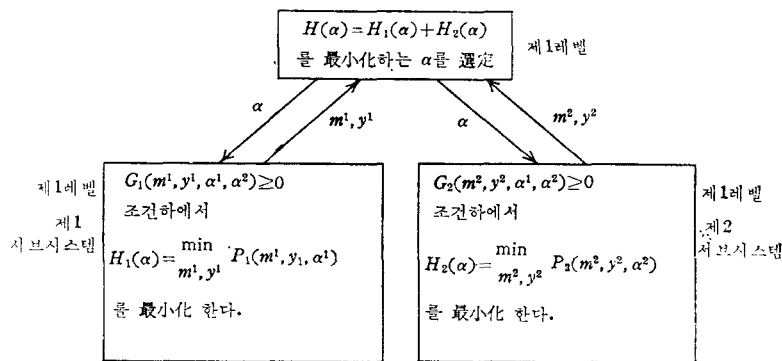


그림 3-2. 모델 協調法에 의한 multilevel 解法

2. 目的協調法

目的協調法은 서브시스템間의 모든 結合을 切斷

하므로써, 綜合最適化問題를 各 서브시스템에서 獨立的으로 施行하는 것이다.

즉, 그림 3-3와 같이 分割하고, 서브시스템 i 는

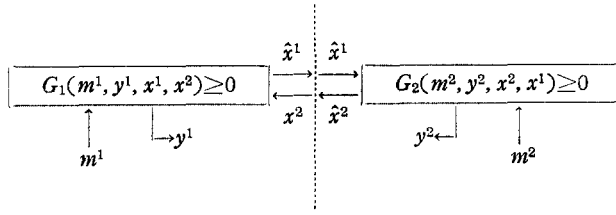


그림 3-3. 結合을 切斷시킨 시스템

自己의 目的函數를 最小化하기 위하여 相互作用變數 $x_j (i \neq j)$ 를 다른 操作變數로 取扱한다.

여기서 他서비스시스템의 入力이 되는 出力을 \hat{x}^i 라 하고, \hat{x}^i 에 對應하는 서비스시스템의 入力を x^i 라 한다.

위에 기술한 바와 같이 相互作用을 切斷하였으므로, \hat{x}^i 와 x^i 는 같을 必要가 없다. 또 x^i 도 操作變數로서 m, y 와 같이 取扱한다.

이와 같이 하면 2개의 서비스시스템은 完全히 分離되고, 또 目的函數도 分離되므로, 各 서비스시스템의 最適化를 獨立의으로 實行할 수 있다.

그러나 個個의 서비스시스템 問題에서 全體의 最適值를 얻기 위해서는 相互平衡原理가 滿足되는 것, 即獨立의으로 選擇한 \hat{x}^i 와 x^i 가 實際的으로 같게할 必要가 있다.

이 multi-level 問題의 定式化는 第1레벨에서 相互作用變數를 切斷하여 獨立된 서비스시스템의 問題를 最適化하고, 第2레벨에서는 第1레벨의 各 서비스시스템 問題가 相互平衡原理를 만족시키는 解를 갖게끔 하는 것이다.

이것은 제1레벨 問題의 目的을 수정하므로써 이루어진다.

相互作用의 平衡을 取하기 위하여, Lagrange 乘數를 導入한 目的函數를

$$P(m, y, \hat{x}, x, \lambda) = P_1(m^1, y^1, \hat{x}^1) + P_2(m^2, y^2, \hat{x}^2) + \lambda^T(\hat{x} - x) \quad (3-10)$$

라 한다.

x 의 變數를 導入하므로써 시스템에 대한 拘束條件은

$$G_1(m^1, y^1, \hat{x}^1, x^2) \geq 0 \quad (3-11)$$

$$G_2(m^2, y^2, \hat{x}^2, x^1) \geq 0 \quad (3-12)$$

로 된다. 拘束條件을 滿足하는 變數 m, y, \hat{x}, x 의 集合은

$$S_0 = \{(m, y, \hat{x}, x) | G_1, G_2 \geq 0\} \quad (3-13)$$

로 定義된다.

이 集合에 屬하는 變數에 의해서 目的函數를 最小化 하려면

$$H(\lambda) = \min_{(m, y, \hat{x}, x)} \epsilon s_0 P(m, y, \hat{x}, x, \lambda) \quad (3-14)$$

와 같은 λ 만의 函數로 된다.

$H(\lambda)$ 의 定義域으로서

$$S_1 = \{\lambda | H(\lambda) \text{가 存在한다}\} \quad (3-15)$$

를 定義한다.

Lagrange 定義의 項은

$$\lambda^T(\hat{x} - x) = \lambda_1^T(\hat{x}^1 - x^1) + \lambda_2^T(\hat{x}^2 - x^2) \quad (3-16)$$

와 같이 展開한다.

이와 같이 하여 제1레벨 問題는 다음과 같이 分離된다. 即

(i) 서비스시스템 1

$$G_1(m^1, y^1, \hat{x}^1, x^2) \geq 0 \quad (3-17)$$

의 條件下에서

$$\min_{m^1, y^1, \hat{x}^1, x^2} P_1(m^1, y^1, \hat{x}^1) + \lambda_1^T \hat{x}^1 - \lambda_2^T x^2 \quad (3-18)$$

를 實行한다.

(ii) 서비스시스템 2

$$G_2(m^2, y^2, \hat{x}^2, x^1) \geq 0 \quad (3-19)$$

의 條件下에서

$$\min_{m^2, y^2, \hat{x}^2, x^1} P_2(m^2, y^2, \hat{x}^2) - \lambda_1^T x^1 + \lambda_2^T \hat{x}^2 \quad (3-20)$$

를 實行한다.

한편 제2레벨의 유닛의 目的은 λ 를 操作하므로써, 제1레벨의 目的函數 P_1, P_2 에 영향을 주고, 최종적으로

$$\hat{x}^1 = x^1, \hat{x}^2 = x^2 \quad (3-21)$$

가 成立되게 하는 것이므로, 目的協調法이라 부른다.

協調變數 λ 는 模型協調法의 경우와 똑같이 相互作用變數로 固定하여 제1레벨 問題를 풀고, 제2레벨은 固定된 變數의 最適值를 결정한다.

數值計算에 의해서 問題를 풀이할 경우에는, 2개 레벨間에서 問題를 서로 주고 받음을 反復하므로써 그 解가 얻어진다. 目的協調法을 圖示하면 그림 3-

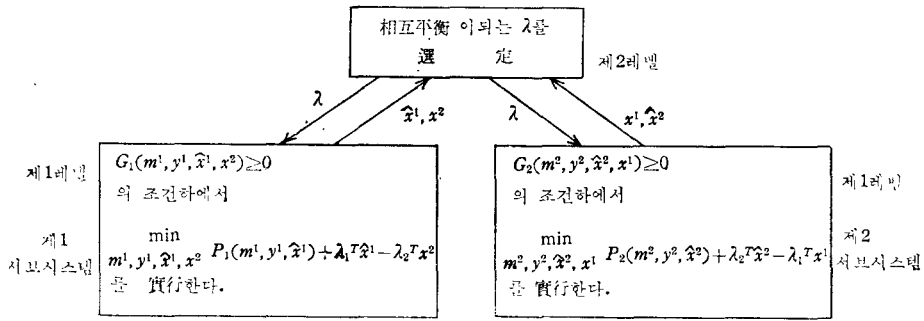


그림 3-4. 目的協調法에 의한 multilevel 解法

4과 같다. 여기서 各 레벨의 問題는

第1레벨문제

領域 S_0 에서 $P(m, y, \hat{x}, \lambda)$ 를 最小化하고, $H(\lambda)$ 를 定義한다.

第2레벨문제

제1레벨문제에 대한 解가 相互平衡原理를 만족하도록 λ 를 選定한다.

IV. 階層시스템의 感度定數計算 algorithm.

電力系統의 運用 및 制御에 있어서 가장 基礎가 되는 것은 各種 系統特性定數(感度定數)이다. (2), (3)

大規模電力系統을 몇개의 서비스시스템으로 分割하여 階層制御를 施行할 때, 系統이 分割된 狀態에서 各種 系統特性定數를 求할 수 있는 algorithm에 대하여 기술한다.

1. 基本方程式의 誘導

그림 4-1과 같은 어느 大規模電力系統을 K 개의 서비스시스템 1, 2, ..., K 로 分割하였을 경우에 대하여 考察한다.

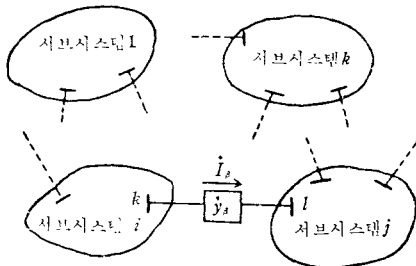


그림 4-1. 系統分解

서비스시스템 $i(i=1, 2, \dots, K)$ 에 포함되어 있는 마디數를 $N^{(i)}$, 各 서비스시스템을 結合하고 있는 連絡線의 總數를 L , 서비스시스템 i 의 마디중에서 連絡線에 接續되어 있는 마디數를 $J^{(i)}$ 라 한다. 剩의 間 連絡線路에 接續되어 있지 않는 마디 번호순을 1, 2, ..., $N^{(i)} - J^{(i)}$ 라 하고, 連絡線路에 接續되어 있는 것을 $N^{(i)} - J^{(i)} + 1, \dots, N^{(i)}$ 라 한다.

서비스시스템 i 의 電力潮流는 다음과 같이 $N^{(i)}$ 元의 複素數 連立方程式으로 表示된다. (2), (3)

$$P_k^{(i)} + jQ_k^{(i)} = C_k^{(i)} + jD_k^{(i)} + \dot{E}_k^{(i)} \sum_{\alpha}^{N^{(i)}} [Y_{k\alpha}^{(i)} \dot{E}_\alpha^{(i)}]^* \quad (k=1, 2, \dots, N^{(i)} - J^{(i)}) \quad (4-1)$$

$$P_k^{(i)} + jQ_k^{(i)} = C_k^{(i)} + jD_k^{(i)} + \dot{E}_k^{(i)} \sum_{\alpha}^{N^{(i)}} [Y_{k\alpha}^{(i)} \dot{E}_\alpha^{(i)}]^* + \dot{E}_k^{(i)} \sum_{\beta}^L [\xi_{k\beta}^{(i)} \dot{I}_\beta]^* \quad (k=N^{(i)} - J^{(i)} + 1, \dots, N^{(i)}) \quad (4-2)$$

여기서

$P_k^{(i)}, Q_k^{(i)}$: 各各 마디 k 에서의 發電有效 및 無効電力

$C_k^{(i)}, D_k^{(i)}$: 各各 마디 k 에서의 消費有效 및 無効電力

α : 마디 k 의 隣接마디(k 自身도 포함)

β : 마디 k 에 接續하는 連絡線路의 番號

\dot{I}_β : 連絡線路 β 를 通하여 마디 k 에 流入 또는 마디 k 에서 流出하는 電流 벡터

$\xi_{k\beta}^{(i)}$: 電流 \dot{I}_β 가 마디 k 에 流入할 때는 -1 , 流出할 때는 $+1$ 이 되는 係數

지금 마디 k 의 電壓벡터 $\dot{E}_k^{(i)}$, 어드미턴스 $Y_{k\alpha}^{(i)}$ 및 連絡線電流벡터 \dot{I}_β 를

$$\begin{aligned} \dot{E}_k^{(i)} &= E_k^{(i)} [\cos \theta_k^{(i)} + j \sin \theta_k^{(i)}] \\ \dot{Y}_{k\alpha}^{(i)} &= G_{k\alpha}^{(i)} + jB_{k\alpha}^{(i)} \\ \dot{I}_\beta &= I_\beta (\cos \varphi_\beta + j \sin \varphi_\beta) \end{aligned}$$

로 表示하고, 이것을 式 (4-1), (4-2)에 代入하여 實數部와 虛數部(有功電力分과 無効電力分)으로 나누면, $2N^{(i)}$ 個의 方程式 $g_{2k-1}^{(i)}=0, g_{2k}^{(i)}=0$ ($k=1, 2, \dots, N^{(i)}$)이 成立한다. 즉 $k=1, 2, \dots, N^{(i)}-J^{(i)}$ 에 대하여

$$\begin{aligned} g_{2k-1}^{(i)} &= C_k^{(i)} - P_k^{(i)} \\ &+ E_k^{(i)} \sum_{\alpha} E_{\alpha}^{(i)} \{G_{k\alpha}^{(i)} \cos(\theta_k^{(i)} - \theta_{\alpha}^{(i)}) \\ &+ B_{k\alpha} \sin(\theta_k^{(i)} - \theta_{\alpha}^{(i)})\} = 0 \end{aligned} \quad (4-3)$$

$$\begin{aligned} g_{2k}^{(i)} &= D_k^{(i)} - Q_k^{(i)} + E_k^{(i)} \sum_{\alpha} E_{\alpha}^{(i)} \{G_{k\alpha}^{(i)} \sin \\ &(\theta_k^{(i)} - \theta_{\alpha}^{(i)}) - B_{k\alpha} \cos(\theta_k^{(i)} - \theta_{\alpha}^{(i)})\} \\ &= 0 \end{aligned} \quad (4-4)$$

또, $k=N^{(i)}-J^{(i)}+1, \dots, N^{(i)}$ 에 대하여

$$\begin{aligned} g_{2k-1}^{(i)} &= C_k^{(i)} - P_k^{(i)} \\ &+ E_k^{(i)} \sum_{\alpha} E_{\alpha}^{(i)} \{G_{k\alpha}^{(i)} \cos(\theta_k^{(i)} - \theta_{\alpha}^{(i)}) \\ &+ B_{k\alpha} \sin(\theta_k^{(i)} - \theta_{\alpha}^{(i)}) \\ &+ E_k^{(i)} \sum_{\beta} \xi_{k\beta}^{(i)} I_{\beta} \cos(\theta_k^{(i)} - \varphi_{\beta}) = 0 \end{aligned} \quad (4-5)$$

$$\begin{aligned} g_{2k}^{(i)} &= D_k^{(i)} - Q_k^{(i)} \\ &+ E_k^{(i)} \sum_{\alpha} E_{\alpha}^{(i)} \{G_{k\alpha}^{(i)} \sin(\theta_k^{(i)} - \theta_{\alpha}^{(i)}) \\ &- B_{k\alpha} \cos(\theta_k^{(i)} - \theta_{\alpha}^{(i)}) \\ &+ E_k^{(i)} \sum_{\beta} \xi_{k\beta}^{(i)} I_{\beta} \sin(\theta_k^{(i)} - \varphi_{\beta}) = 0 \end{aligned} \quad (4-6)$$

다음, 서브시스템間에 連結되어 있는 連絡線路에 흐르는 線電流의 方程式에 대하여 考察한다. 그림 (4-1)에서 표시한 바와 같이 서브시스템 i 의 마디 k 가 線路番號 β 인 連絡線路에 의하여 서브시스템 j 의 마디 l 에 連結되어 있다고 하면, 連絡線路電流는

$$\begin{aligned} \dot{I}_{\beta} &= \dot{y}_{\beta} [\xi_{k\beta}^{(i)} \dot{E}_k^{(i)} + \xi_{l\beta}^{(j)} \dot{E}_l^{(j)}] \\ &(\beta=1, 2, \dots, L) \end{aligned} \quad (4-7)$$

로 쓸 수 있다. 그림 (4-1)의 例에서 $\xi_{k\beta}^{(i)}=1, \xi_{l\beta}^{(j)}=-1$ 로 된다.

여기서, \dot{y}_{β} 는 連絡線路 β 의 線路 어드미턴스이다. 지금 $\dot{y}_{\beta}=G_{\beta}+jB_{\beta}$ 라 하고 式 (4-7)을 實數部와 虛數部로 나누면

$$\begin{aligned} h_{2\beta-1} &= G_{\beta}(\xi_{k\beta}^{(i)} E_k^{(i)} \cos \theta_k^{(i)} \\ &+ \xi_{l\beta}^{(j)} E_l^{(j)} \cos \theta_l^{(j)}) - B_{\beta}(\xi_{k\beta}^{(i)} E_k^{(i)} \sin \theta_k^{(i)} \\ &+ \xi_{l\beta}^{(j)} E_l^{(j)} \sin \theta_l^{(j)}) - I_{\beta} \cos \varphi_{\beta} = 0 \end{aligned} \quad (4-8)$$

$$\begin{aligned} h_{2\beta} &= G_{\beta}(\xi_{k\beta}^{(i)} E_k^{(i)} \sin \theta_k^{(i)} \\ &+ \xi_{l\beta}^{(j)} E_l^{(j)} \sin \theta_l^{(j)}) + B_{\beta}(\xi_{k\beta}^{(i)} E_k^{(i)} \cos \theta_k^{(i)} \\ &+ \xi_{l\beta}^{(j)} E_l^{(j)} \cos \theta_l^{(j)}) - I_{\beta} \sin \varphi_{\beta} = 0 \end{aligned} \quad (4-9)$$

(여기서 $\beta=1, 2, \dots, L$ 인)

로 表示되는 $2L$ 個의 連立方程式이 成立한다.

앞에서 기술한 基本方程式 (4-3)~(4-6), (4-8), 및 (4-9)에 포함된 變數를 感度解析의 立場에서 變의 상 3種類로 分類한다. 卽

- (1) 從屬變數벡터 $y^{(i)}$ ($2N^{(i)}$ 次元벡터)
- (2) 操作變數벡터 $m^{(i)}$ (M 次元벡터)
- (3) 連絡變數벡터 x ($2L$ 次元벡터)

基本方程式을 이들 3種類の 벡터 $y^{(i)}, m^{(i)}, x$ 로 表示하면

$$G^{(i)}(y^{(i)}, m^{(i)}, x) = 0 \quad (4-10)$$

$$H(y^{(1)}, \dots, y^{(K)}, x) = 0 \quad (4-11)$$

와 같이 된다.

여기서 $G^{(i)}$ 는 $g_{2k-1}^{(i)}$ 를 $g_{2k}^{(i)}$ ($k=1, 2, \dots, N^{(i)}$)를 要素로 하는 列벡터, H 는 $h_{2\beta-1}, h_{2\beta}, \dots, h_{2L}$ ($\beta=1, 2, \dots, L$)를 要素로 하는 벡터이다. 卽

$$G^{(i)} \equiv \text{col}[g_1^{(i)}, g_2^{(i)}, \dots, g_{2N^{(i)}}^{(i)}] \quad (4-12)$$

$$H \equiv \text{col}[h_1, h_2, \dots, h_{2\beta-1}, h_{2\beta}, \dots, h_{2L}] \quad (4-13)$$

이다. 단, 記號 col은 列벡터를 의미한다. 式 (4-10)과 式 (4-11)의 關係를 圖示하면 그림 4-2와 같다. 卽, 式 (4-10)에서 表示된 서브시스템 i 의 狀態變數벡터 $y^{(i)}$ 는 連絡變數벡터 x 를 固定하면, 操作變數벡터 $m^{(i)}$ 의 값에 따라 定해지고, 한편 式 (4-11)은 각 서브시스템의 狀態變數벡터 $y^{(i)}$ ($i=1, 2, \dots, K$)의 값이 定해지면, 連絡變數벡터 x 의 값이 定해지는 것을 보여주고 있다.

2. 感度解析理論

式 (4-10), (4-11)으로 表示된 電力系統이 어떤 運轉狀態($y_0^{(i)}, m_0^{(i)}, x_0$)에서 運轉되고 있을 때, 서브시스템 i 內의 調整設備를 操作하여, 操作變數 벡터가 $m_0^{(i)}$ 에서 $m_0^{(i)} + \Delta m^{(i)}$ 로 變化되었다고 한다. 이때 電力潮流方程式 (4-10), (4-11)을 滿足시키기 위하여, 從屬變數벡터 $y^{(i)}$ 가 $y_0^{(i)}$ 에서 $y_0^{(i)} + \Delta y^{(i)}$ 로, 連絡變數벡터 x_0 가 x_0 에서 $x_0 + \Delta x$ 로 變化되었다고 하면

$$G^{(i)}(y_0^{(i)} + \Delta y^{(i)}, m_0^{(i)} + \Delta m^{(i)}, x_0 + \Delta x) = 0 \quad (4-14)$$

$$H(y_0^{(1)} + \Delta y^{(1)}, \dots, y_0^{(K)} + \Delta y^{(K)}, x_0 + \Delta x) = 0 \quad (4-15)$$

이 成立한다.

여기서 $\Delta m^{(i)}$ 를 微小量으로 하면, 일반적으로 $\Delta y^{(i)}$ 도 微小量이 되므로, 式 (4-14), (4-15)를 初期狀態($y_0^{(i)}, m_0^{(i)}, x$)를 中心으로 Taylor 級數로

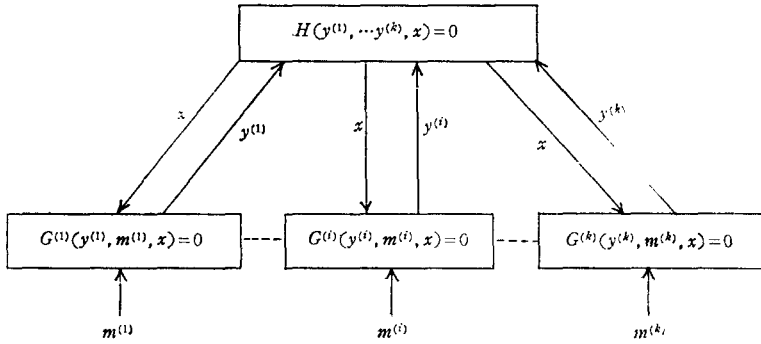


그림 4-2. 식 (4-10), (4-11)의 관계

展開하고, $\Delta y^{(i)}$, $\Delta m^{(i)}$, Δx 에 관한 2次 以上の微小量을 無視하면

$$G_y^{(i)} \cdot \Delta y^{(i)} + G_m^{(i)} \cdot \Delta m^{(i)} + G_x^{(i)} \cdot \Delta x = 0 \quad (4-16)$$

$$H_y^{(1)} \cdot \Delta y^{(1)} + \dots + H_y^{(k)} \cdot \Delta y^{(k)} + H_x \cdot \Delta x = 0 \quad (4-17)$$

이 成立한다.

여기서 $G_y^{(i)}$ 는 函數벡터 $G^{(i)}$ 의 從屬變數벡터 $y^{(i)}$ 에 관한 Jacobian 行列($2N^{(i)}$ 次元正方形行列)이다.

$$\text{即, } G_y^{(i)} \equiv \frac{\partial(g_1, g_2, \dots, g_{2N^{(i)}})}{\partial(y_1, y_2, \dots, y_{2N^{(i)}})} \quad (4-18)$$

따 같가지로

$$G_m^{(i)} \equiv \frac{\partial(g_1, g_2, \dots, g_{2N^{(i)}})}{\partial(m_1, m_2, \dots, m_M^{(i)})} \quad (2N^{(i)} \times M^{(i)}) \quad (4-19)$$

$$G_x^{(i)} \equiv \frac{\partial(g_1, g_2, \dots, g_{2N^{(i)}})}{\partial(x_1, x_2, \dots, x_{2L})} \quad (2N^{(i)} \times 2L) \quad (4-20)$$

$$H_y^{(i)} \equiv \frac{\partial(h_1, h_2, \dots, h_{2L})}{\partial(y_1, y_2, \dots, y_{2N^{(i)}})} \quad (2L \times 2N^{(i)}) \quad (4-21)$$

$$H_x \equiv \frac{\partial(h_1, h_2, \dots, h_{2L})}{\partial(x_1, x_2, \dots, x_{2L})} \quad (2L \times 2L) \quad (4-22)$$

여기서 () 內는 各行列의 次元을 表示한다.

式(4-16)을 $\Delta y^{(i)}$ 에 대하여 풀면

$$\Delta Y^{(i)} = -G_y^{(i)-1}(G_m^{(i)} \cdot m^{(i)} + G_x^{(i)} \cdot \Delta x) \quad (4-23)$$

이 된다. 여기서 $G_y^{(i)-1}$ 은 $G_y^{(i)}$ 의 逆行列이다. 지만,

$$S_m^{(i)} \equiv -G_y^{(i)-1} G_m^{(i)} \quad (4-24)$$

$$S_x^{(i)} \equiv -G_y^{(i)-1} G_x^{(i)} \quad (4-25)$$

따 같으면 式 (4-23)은

$$\Delta y^{(i)} = S_m^{(i)} \cdot \Delta m^{(i)} + S_x^{(i)} \cdot \Delta x \quad (4-26)$$

와 같이 表示된다.

式 (4-26)을 式 (4-17)에 代入하여, Δx 에 대하여 풀면

$$\begin{aligned} \Delta x = & -T^{-1} [H_y^{(1)} \cdot S_m^{(1)} \cdot \Delta m^{(1)} \\ & + H_y^{(2)} \cdot S_m^{(2)} \cdot \Delta m^{(2)} + \dots \\ & + H_y^{(k)} \cdot S_m^{(k)} \cdot \Delta m^{(k)}] \end{aligned} \quad (4-27)$$

가 얻어진다. 단, T^{-1} 은

$$T = [H_x + H_x^{(1)} \cdot S_x^{(1)} + \dots + H_x^{(k)} \cdot S_x^{(k)}] \quad (4-28)$$

로 表示되는 ($2L \times 2L$)의 正方形行列 T 의 逆行列이다.

3. Algorithm

大規模電力系統을 몇개의 서브시스템으로 분할한 후, 各 서브시스템 $i(i=1, 2, \dots, K)$ 의 操作變數 $m^{(i)}$ 를 $\Delta m^{(i)}$ 만큼 變化시켰을 때, 系統의 潮流狀態 變化를 나타내는 變數벡터 $y^{(i)}$ 의 變化 $\Delta y^{(i)}$ 는 다음과 같은 단계로 計算된다.

(1) 단계 1: 各 서브시스템에서 初期潮流狀態 ($y_0^{(i)}$, $m_0^{(i)}$, x_0)에 관한 Jacobian 行列, $G_y^{(i)}$, $G_m^{(i)}$, $G_x^{(i)}$ 를 計算하고, 感度行列 $S_m^{(i)}$, $S_x^{(i)}$ 를 式 (4-24), (4-25)에 의하여 求한다.

(2) 단계 2: 連絡線路方程式에서, $H_y^{(i)}$, H_x 를 計算하고, 단계 1의 $S_x^{(i)}$ 를 이용하여 式 (4-28)의 行列 T 를 計算한 후 T^{-1} 를 求한다.

(3) 단계 3: 各 서브시스템을 連結시키고 있는 連絡線路가 없는 것으로 가정하였을 때의 操作變數벡터 變化 $\Delta m^{(i)}$ 에 대한 從屬變數벡터 變化 $\Delta y^{(i)}$ 를 求한다.

$$\Delta y^{(i)'} = S_m^{(i)} \cdot \Delta m^{(i)} \quad (4-29)$$

(4) 단계 4: 단계 3에서 求한 $\Delta y^{(i)'}$ 를 이용하여, 式 (4-27)에서 連絡變數벡터 變化 Δx 를 求한다.

$$\Delta x = -T^{-1} [H_y^{(1)} \cdot \Delta y^{(1)'} + \dots + H_y^{(K)} \cdot \Delta y^{(K)'}] \quad (4-30)$$

(5) 단계 5: 連絡變數벡터 變化 Δx 에 대한 從屬變數벡터 變化 $\Delta y^{(i)'}$ 를 구한다.

$$\Delta y^{(i)'} = S_x^{(i)} \cdot \Delta x \quad (4-31)$$

(6) 단계 6: 式 (4-29) 과 式 (4-31) 을 서로 더하여, 서브시스템의 從屬變數더變化 $\Delta y^{(i)}$ 를 구한다.

$$\Delta y^{(i)} = \Delta y^{(i)'} + \Delta y^{(i)''} \quad (4-32)$$

위에 기술한 단계 1~6에 의하여, 系統內에서 任意의 調整設備를 操作하였을 때의 從屬變數의 變化分이 計算된다.

또한 分解前의 全系統에 대한 感度行列은 다음과 같은 方法으로 求한다.

우선 全系統에 대하여

$$y = \text{col} [y^{(1)'} , y^{(2)'} , \dots , y^{(K)'}]$$

$$\{2(N^{(1)} + \dots + N^{(K)}) \text{ 次元벡터}\}$$

$$m = \text{col} [m^{(1)'} , m^{(2)'} , \dots , m^{(K)'}]$$

$$\{M^{(1)} + \dots + M^{(K)} \text{ 次元벡터}\}$$

와 같은 列벡터를 定義한다.

지금, 操作變數벡터 m 의 變化 Δm 이 第 γ 要素

만이 1이고, 그 以外는 0이라 한다. 즉,

$$\Delta m_\gamma = [\dots 0 \ 1 \ 0 \dots 0] \quad (4-32)$$

이때 從屬變數벡터의 變化는 앞에 기술한 단계 1~6에 의하여 計算되며, 이를

$$\Delta y_\gamma = \text{col} [\Delta y_\gamma^{(1)'}, \dots, \Delta y_\gamma^{(K)'}] \quad (4-33)$$

라 하고, $\gamma=1, 2, \dots, M^{(1)} + \dots + M^{(K)}$ 에 대하여 計算하면, 全系統의 感度行列은

$$S = \begin{bmatrix} \vdots & \vdots & \vdots \\ \Delta y_1 & \Delta y_2 & \dots & \Delta y_{M^{(1)} + \dots + M^{(K)}} \end{bmatrix} \quad (4-34)$$

인 $2(N^{(1)} + \dots + N^{(K)}) \times (M^{(1)} + \dots + M^{(K)})$ 行列로 求할 수 있다.

V. 모델系統에 대한 計算例

앞에서 記述한 分割 algorithm 을 應用하여, 모델系統의 系統特性定數를 計算하고, 連系가 系統特性定數에 미치는 영향에 대하여 考察한다.

그림 5-1 (a)에서 數字는 線路임피던스 및 電壓의 크기와 位相角이다.

모델系統에서 마다 3과 1을 連結한 線路를 切斷

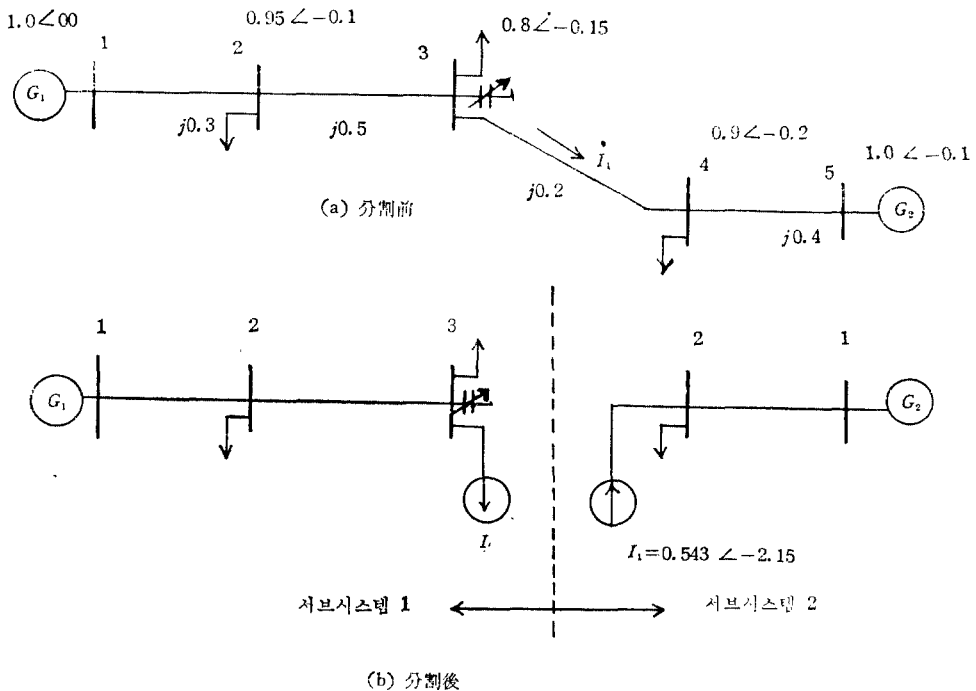


그림 5-1. 모델 系統

하여, 그림 5-1(b)와 같이 2개의 서브시스템으로 분할한다.

모델系統에서 각 서브시스템의 操作變數 벡터 $m^{(i)}$ 를 다음과 같이 選定한다.

$m_1^{(1)}$: 서브시스템 1에서 마디 1의 發電機端子電壓 ($E_1^{(1)}$)

$m_2^{(1)}$: 서브시스템 1에서 마디 3의 並列콘덴서($D_3^{(1)}$)

$m_1^{(2)}$: 서브시스템 2에서 마디 1의 發電機端子電壓 ($E_1^{(2)}$)

從屬變數벡터 $y^{(i)}$ 는 각 마디의 運轉條件에 따라 다음과 같이 된다.

$y_1^{(1)}, y_2^{(1)}$: 각각 서브시스템 1에서 마디 2의 電壓 크기($E_2^{(1)}$) 및 位相角($\theta_2^{(1)}$)

$y_3^{(1)}, y_4^{(1)}$: 각각 서브시스템 1에서 마디 3의 電壓 크기($E_3^{(1)}$) 및 位相角($\theta_3^{(1)}$)

$y_1^{(2)}, y_2^{(2)}$: 각각 서브시스템 2에서 마디 2의 電壓 크기($E_2^{(2)}$) 및 位相角($\theta_2^{(2)}$)

本 algorithm에 의하여 計算된 系統特性定數는 표 5-1과 같이 된다.

表 5-1에서 ()의 數値는 連絡線路에 흐르는 電流가 一定하다 하고, 連系를 無視할 때 感度行列에서 求해진 特性定數로, 連系를 考慮한 特性定數와 큰 差異가 있다.

이는 系統連系時 電壓變動의 減少理論과 一致하는 것이다.

表5-1. 모델系統의 系統特性定數

操作變數	從 屬 變 數					
	$E_2(E_2^{(1)})$	$\theta_2(\theta_2^{(1)})$	$E_3(E_3^{(1)})$	$\theta_3(\theta_3^{(1)})$	$E_4(E_2^{(2)})$	$\theta_4(\theta_2^{(2)})$
$E_1(E_1^{(1)})$	-0.7803 (-0.9958)	0.1417 (0.3805)	0.6256 (0.9942)	0.7381 (0.8614)	0.10838	0.3240
$D_3(D_2^{(1)})$	-0.2407 (-0.3393)	-0.0552 (-0.1789)	-0.8647 (-0.9429)	-0.3372 (-0.5256)	-0.3212	-0.8175
$E_5(E_1^{(2)})$	0.6155	0.2356	0.2114	0.2771	0.5344 (0.6013)	0.259 (0.3182)

Ⅶ. 結 論

大規模電力系統에서 感度行列에 의한 系統特性定數를 計算할 때 Jacobian 行列의 逆行列計算이 要求된다.

Jacobian 行列의 逆行列은 元行列에 비하여 非零要素가 많으므로, 計算機의 記錄容量이 현저히 增大될 뿐만 아니라, 그 값의 精度가 낮아질 虞가 있다.

따라서 本論文은 大規模電力系統을 몇개의 서브시스템으로 分割하여 階層制御를 實行함에 있어서, 系統分割時 感度定數를 效果의으로 求할 수 있는 algorithm에 대하여 說明하고, 모델系統에 本方式을 適用한 다음 그 效果를 提示하였다.

만일 약 50개 마디를 갖고 있는 우리나라 電力系統에서 電壓無効電力制御에 必要로 하는 系統特性定數를 計算할 경우, 從來方式으로 全系統을 一括해서 取扱하면 計算機 메모리는 $(2 \times 50)^2 = 10,000$

個가 要求된다.

한편 全系統을 3개의 서브시스템으로 分割하고, 각 서브시스템의 마디수를 각각 20, 15, 15개, 切斷되는 連絡線路를 각각 3개라고 하면, 本方式에서는 $G, y^{(i)-1}$ 計算에 $(2 \times 20)^2 + (2 \times 15)^2 \times 2 = 3,400$ 개, $S, y^{(i)}$ 및 $H, y^{(i)}$ 計算에 各各 $(2 \times 20) \times (2 \times 3) + (2 \times 15) \times (2 \times 3) \times 2 = 600$ 개, 또 H, T^{-1} 計算에 各各 $(2 \times 6) \times (2 \times 6) = 144$ 개로서 全體 約 5,000個가 要求되므로 計算機메모리가 半으로 節減된다.

또한 所要計算時間도 상당히 短축될 것이 예상되므로 大規模電力系統의 on-line 制御에 本方式이 매우 유익할 것으로 간주된다.

또한 本論文은 階層시스템으로서의 電力系統構造와 協調理論을 적용한 階層시스템의 最適制御理論에 대하여 記述하였으므로, 앞으로 大規模電力系統의 階層制御에 도움이 되리라 믿는 바이다.

끝으로 本研究를 지원하여 주신 문교부 당국에 감사드립니다.

參 考 文 獻

1. 小林侂史, “電力系統의 最適運用에 관한 研究”, 學位論文.
2. 成田, 多田, “感度行列에 기초를 둔 電壓無効電力에 관한 系統特性定數의 決定法”, 日本電氣學會誌, vol.88, No.959, 1968.
3. A. Kishore, E.E. Hill, “Static optimization of reactive power sources by use of sensitivity parameters,” IEEE, Trans. vol. PAS-90, pp.1163-1173, 1971.
4. M. G. Singh, A. Titli, “Systems (Decomposition, Optimisation and Control), Pergamon, pp.172-195, 1978.
5. 宋吉榮, “電力系統에 있어서 電壓·無効電力制御에 관한 研究”, 學位論文, 1967.
6. Mihajlo D, Mesarevic, “Multilevel, systems and Concepts in Process Control,” proc. of IEEE, vol.58, No.1, pp.111-125, 1970.
7. Elgerd; “Electric Energy System Theory,” McGraw-Hill.
8. Pierre; “Optimization Theory with Application,” wiley.
9. D. A. Wismer; “Optimization Methods for Large-Scale,” McGraw-Hill.
10. C. H. Jolissaint, N.V. Arvanitidis; “Decomposition of Real and Reactive Power Flows: A Method Suited for On-Line Applications,” IEEE. Trans, PAS 91, pp.661-670, 1972.