

分割法을 이용한 最適 無効電力設備 計劃

Optimal Reactive Power Planning Using Decomposition Method

金正夫* · 鄭銅元* · 金建中** · 朴永文***

(*Jeong-Boo Kim · Dong-Won Jung · Keon-Joong Kim · Young-Moon Park)

요 약

본 연구의 목적은 정상 운용상태에서 송전계등의 무효전력설비 계획에 관한 효과적인 옐고리즘을 제시하는데 있다. 최적 투자계획을 하기 위하여는 최적 전력계통 운용이 선행되어야 한다. 계통운용 문제는 유효, 무효전력 최적문제로 분할된다. 이 두문제에서 다같이 발전비용을 목적함수로 사용하였다. 투자문제에서는 운용변수와 투자변수를 분리할 수 있는 새로운 변수 분할기법을 사용하였으며 최적문제는 경사투영법을 이용하여 풀도록 하였다.

Abstract- This paper presents an efficient algorithm for the reactive power planning of transmission network under normal operating conditions. The optimal operation of a power system is a prerequisite to obtain the optimal investment planning. The operation problem is decomposed into a P-optimization module and a Q-optimization module, but both modules use the same objective function of generation cost. In the investment problem, a new variable decomposition technique is adopted which can separate the operation and the investment variables. The optimization problem is solved by using the gradient projection method (GPM).

1. 서 론

最近 電力系統이 大型化 되어짐에 따라 계통의 운전은 한층 복잡하게 되고, 産業이 發達하고 점점 高度化 되어짐에 따라 系統의 運用을 원활히

할 수 있는 設備計劃이 요청된다.

大都市 負荷密度의 增加와 電源地間의 距離가 멀어져 감에 따라 送電電壓은 점점 높아지고 地中 送配電 線路도 널리 보급되고 있는 實情이다. 이러한 現象들은 自然히 線路의 充電 容量을 增加시켜 輕負荷時 母線電壓 또는 수용가의 電壓上昇을 일으켜 機器의 壽命 劣化를 촉진시키게 된다. 또한 夏節期에는 冷房負荷가 일시에 많이 걸리므로 電壓이 떨어져 系統의 安定度가 問題되는 경우도 있다. 1977年 유옥의 大停電事故, 1987年 日本 동

*正 會 員 : 韓電技術研究院 責任研究員

**正 會 員 : 忠南大 工大 電氣工學科 副教授 · 工博

***正 會 員 : 서울大 工大 電氣工學科 教授 · 工博

接受日字 : 1989年 4月 6日

1次修正 : 1989年 7月 11日

경전력의 대정전사고는 夏節期 無効電力 需要를 系統이 신속히 供給해주시 못해서 系統電壓이 基準値 以下로 떨어져 發生한 事故로 알려져 있다.

調相設備 設置 運用의 目的은 系統의 電壓을 適正한 水準으로 維持시키기 위한 것이지만, 부차적으로 系統의 電壓을 安定하여 유지시킴으로써 全體 系統의 安定度を 維持할 수 있게 한다. 또한 系統內 送電損失이 감소될 수 있다.

이 분야에 대한 現在까지의 研究動向은 보면 다음과 같다.

1968年R.Maliszewski[1]에 의한 線形計測法을 活用 試行錯誤法으로 無効電力 容量 決定에 대한 研究가 있었고 1971년에는 A. Kishore[2]에 의해 感度分析에 의한 最適無効電力 決定에 關한 研究가 發表되었다. 1975년에는 Sachdeva, Billington [3]에 의해 非線形 計測法을 利用한 無効電力源의 設置에 대한 研究가 이루어졌다. 1978년에는 Happ[4]에 의해 線形計測法을 利用 無効電力容量을 決定하였다.

1981년에는 Hughes[5]에 의해 目的函數에 Penalty項을 추가한 非線形 計測法을 이용한 無効電力計劃의 研究가 있었다.

1985年度에 Lebow[6] 등에 依해 投資計劃에 關한 研究가 있었는데 여기서는 Bender의 分割法을 使用하여 投資問題를 比較的 해석적으로 다루고 있다.

本研究에서는 最適投資의 時期를 決定하는 方法을 開發하고 또한 既存의 無効電力 設備를 어떻게 運轉하는 것이 最適인가를 찾아내어 最適 調相設備의 運用に 關한 指針을 아울러 提供하고자 한다.

일반적인 최적조류 계산법의 분할법은 각각 유효전력과 무효전력의 최적화시 서로 完全히 獨立的으로 문제를 풀어가는데 비하여 本 研究는 無効電力의 목적함수를 有効電力의 最適化 結果로 부터 얻어진 系統의 조상설비에 대한 限界費用의 情報를 使用함으로써 무효전력의 최적화시에도 운전비의 경제성을 더욱 달성할 수 있다. 따라서 無効電力의 最適化時에도 運轉費의 감소가 훨씬 두드러지게 되었다. 그리고 無効전력의 最適化時 系統의 各種 物理的인 제약조건들을 모두 고려하여 매우 만족할 만한 電壓 分布와 調相設備의 施設容量 範圍내에서 운전點을 決定할 수 있었다. 그리고 추가로 必要한 조상설비량이 投資費와 運轉費의 합이 最適으로 되는 수준에서 결정될 수 있는 방법을 제시하고 있다. 조상설비에 投資된 設備는 設置 즉시 사용할 수 있다고 가정하였다. 系統의

運轉費用은 年間 運轉費로 評價하였다. 따라서 부하는 조상설비에 影響을 가장 많이 미치는 尖端負荷 基底負荷 및 운전비에 影響을 주로 미치는 중간부하로 분류하여 年間 운전비를 계산하였다.

조상설비의 투자는 年間的 運轉費에 影響을 주게 됨으로 투자문제는 그 규모가 방대하게 된다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위하여 각 부하수준별로 문제를 독립적으로 풀 수 있는 분할법을 도입하여 계산시간과 기억용량을 절감하였다. 본 연구의 결과를 모델 系統에 適用하여 그 効用性을 입증하였다.

2. 最適 調相設備 投資計劃

無効電力 設備計劃은 送電計劃과 함께 電力 系統計劃의 重要한 分野이다. 한 年度의 설비는 當該 年度의 投資에 따라서 매년 變化하는 動的 系統이다. 이러한 投資는 投資計劃期間 동안의 總費用을 最適이 되도록 投資量을 결정하는 最適制御의 문제인 것이다.

2.1 운전비 함수

系統의 총 운전비용은 投資費와 燃料費와 합으로 表示된다. 投資費는 調相設備를 설치하는데 소요되는 費用으로 결정되며 燃料費는 발전 燃料費로 구성된다. 따라서 系統의 計劃期間 동안 총 運轉費用은 다음과 같이 表示된다.

$$F = \sum_{i=1}^N (F_{ui} + F_{oi}) \quad (1)$$

여기서 N 은 計劃年度 期間, F_{ui} 는 i 년도 投資費며 F_{oi} 는 1년도 系統운전비용(發電 燃料費)이다.

여기서 발전 연료비는 年間的 각 부하수준에서의 연료비를 합한 값으로 구해진다. 그러나 投資費는 年初에 投資한 設備를 모든 부하수준에서 사용할 수 있으므로 결국 投資費와 각 부하수준별 발전연료비의 합으로 운전비는 정의된다. 投資費와 發電 燃料費는 다음과 같이 정의 된다.

$$F_{ui} = f_{ci} \sum_{j=1}^J u_{ij}^j \quad (2)$$

$$E_{oi} = f_{oi} \sum_{s=1}^S \sum_{t=1}^T N_s \tau_t F(i, s, t) \quad (3)$$

여기서 $F(i, s, t)$; 한 부하수준에서 발전 연료비
 J : 無効電力設備를 補償할 母線數

- f_{ci} : i 년도 無効電力補償 단위단가의 現在價額 단위
- f_{0i} : i 년도 단위금액의 現在價額
- u_i^j : i 년도 j 모선의 새로 설치할 無効電力 보상량[MVAR]
- S : 각년도의 季節數
- N_s : s 季節의 期間(days)
- T : 每日 Time band數
- τ_i : Time-band (t)의 時間數(hr)

각 부하수준에서 발전 연료비는 다음과 같이 주어진다.

$$F(i, s, t) = \sum_{k=1}^G (A_k + B_k P_k(i, s, t) + C_k P_k^2(i, s, t)) \quad (4)$$

여기서

- G : 發電機 母線數
- $P_k(i, s, t)$: 한 부하수준에서 발전 출력
- A_k, B_k, C_k : k 발전기의 연료비 계수

2.2 負荷 模型

조상설비 計劃을 위한 부하모형은 실제 運轉狀況을 正確히 表示할 수 있어야 하며, 계산에 커다란 어려움이 없도록 모형을 결정하여야 한다. 이와 같은 관점에서 본 論文에서는 負荷를 負荷持續曲線으로 부터 年間的 負荷를 尖頭負荷, 中負荷, 基底負荷의 3단계로 區分하였다. 이와 같이 한 이유는 조상설비의 종류가 두가지로 취급되고 있기 때문이다. 일반적으로 용량성 無効電力 설비는 尖頭負荷時 系統의 電壓을 增加시키는 효과를 가져오고 유도성 무효전력설비는 기저부하시 계통의 이상 電壓上昇을 억제하는 효과가 있다. 그리고 中間負荷는 조상설비가 평상시 系統의 損失을 감소시켜 全體의 運轉비를 감소시키는 影響을 반영하기 위한 것이다.

2.3 投資模型

조상설비 투자모형은 다음과 같이 系統의 制約條件들을 包含하는 最適化 模型으로 表現할 수 있다.

$$\text{Minimize } F = \sum_{i=1}^N (F u_i + F_0 i) \quad (1)$$

$$\text{Such that } X'_{i+1} = X'_i + U'_i \quad (5)$$

Subject to

$$\begin{aligned} g(P_{sg(i, s, t)}, Q_{sg(i, s, t)}, n_{(i, s, t)}) &= 0 \\ \frac{P_{sg, i}}{Q_{sg, i}} &\leq P_{sg(i, s, t)} \frac{P_{sg, i}}{Q_{sg, i}} \\ \frac{Q_{sg, i}}{Q_{c, i}} &\leq Q_{sg(i, s, t)} \leq \frac{Q_{sg, i}}{Q_{c, i}} \\ \frac{Q_{c, i}}{n_i} &\leq Q_{c(i, s, t)} \leq \frac{Q_{c, i}}{n_i} \\ \frac{n_i}{V_i} &\leq n_{(i, s, t)} \leq \frac{n_i}{V_i} \\ \frac{V_i}{h(v, \theta)} &\leq V(Q_{sg, c}, n) \leq \bar{V}_i \\ 0 &\leq u_i' \leq \bar{u}_i' \end{aligned} \quad (6)$$

여기서

- Q_{sg} : 基準 母線을 包含한 발전기와 無効電力 출력 벡터(MVAR)
- Q_c : 補償 無効電力의 벡터(MVAR)
- n : LTC의 비공칭 탭의 벡터
- g : 電力 需給 方程式
- h : 送電 潮流 벡터
- θ : 母線 電壓 位相角 벡터
- x_i^j : i 년도 j 母線에 새로 설치된 無効電力 設備量(MVAR)
- u_i^j : i 년도 j 母線에 새로 추가설치할 無効電力 設備量(MVAR)
- $\bar{\cdot}, -$: 各各 上下限值

(1), (5), (6)의 문제는 Pontryagin의 離散系의 最大原理를 써서 定義하면 다음과 같은 문제와 等價가 된다.

Minimize

$$H_i = F_{ci} + F_{0i} + \Phi^T_{i+1}(x_i + u_i) + \lambda_i^T G_i \quad (7)$$

Subject to the constraints of (6) and

$$\begin{aligned} \Phi_i &= \frac{\partial H_i}{\partial X_i} = \frac{\partial F_{ci}}{\partial X_i} + \frac{\partial V_i}{\partial X_i} + \Phi_{i+1} + \frac{\partial G_i}{\partial X_i} \lambda_i \\ &= \Phi_{i+1} + \frac{\partial G_i}{\partial X_i} \lambda_i \end{aligned} \quad (8)$$

$$\Phi_N = \frac{\partial F_N}{\partial X_N} \quad (9)$$

$$X_{i+1} = X_i + U_i \quad (5)$$

여기서, Φ_i, H_i 는 각각 Lagrange승수, Hamiltonian이다.

F_N 은 무효전력설비의 N 年度 以後는 系統 運轉에 기여하는 金額(Salvage value)이다.

(1)식의 N 年度 問題 대신에 1個年度의 問題인 (7)식을 最適化 함으로써 變數들의 수를 大幅 줄일 수 있다.

그러나 아직도 (6), (7)식으로 주어지는 最適化 問題는 負荷水準別로 각기 다른 變數를 갖게 된다. 이 경우에도 變數의 수는 대단히 많으며 運轉

變數 外에도 투자변수가 추가되므로 問題를 푸는데 어려움이 많다. 그런데 運轉變數 中에서 無効電力量 變數는 제약조건을 다루는데 상당히 不便이다. 왜냐하면 電壓의 절대치를 無効電力으로 表示하는 것은 간단하지 않기 때문이다. 그래서 실제 計算時의 運轉變數는 電壓(V)과 投資量(U)를 使用하였다.

그러나 위의 最適化 問題는 아직도 變數의 수가 너무 많기 때문에 實系統 問題를 다루는데는 現實的으로 計算時間과 記憶容량의 問題로 매우 곤란하다. 따라서 本 論文은 이와같은 問題點을 보완하기 위하여 最適 運用模型과 最適投資模型으로 分割하여 計算할 수 있는 方法을 導入하였다. 조상설비는 투자가 이루어지면 즉시 利用될 수 있고 설치 年度 以後 계속 使用할 수 있다고 가정하였다.

最適 運用模型은 年中 모든 부하수준에 대하여 계산하여야 하므로 운전모형도 各 負荷水準別로 分割하여 풀수 있어야 할 것이다. 다음의 분할 알고리즘은 이와 같은 문제점들을 동시에 解決하여 주는 方法이라고 할 수 있다.

그리고 各各의 運轉模型은 有効電力의 最適化와 無効電力의 最適化 問題로 分割하여 全體 계산 시간을 줄일 수 있다.

3. 分割 알고리즘

3.1 投資模型과 運用模型의 分割

식 (1), (5), (6)으로 주어지는 調相設備 最適化 投資問題는 變數와 記憶容량의 過多로 因하여 實際 計算上的 어려움이 따른다. 이와 같은 問題를 解決하기로 위하여 다음과 같은 分割 알고리즘을 導入하기로 한다. 그런데 이때 適用模型은 線形化에 의하여 線形計劃 문제로 變換될 수 있고, 投資模型도 투자비가 投資量에 線形으로 주어진다고 가정하다. 이와같은 가정에 의해서 위의 問題는 다음과 같은 線形計劃法의 標準形으로 表現할 수 있다.

$$\text{minimize } C_x^T X + C_u^T U \tag{10}$$

$$\text{s. t. } Ax + Bu \leq b_1 \tag{11}$$

$$Du \leq b_2$$

여기서

X : 運用變數 Vector

U : 投資變數 Vector

C_x, C_u : 係數 Vector

A, B, D : 制限行列

b_1, b_2 : 制限 Vector

至今 初期值 u_0 가 許容範圍 內의 點이라고 가정하자. 그리고 투자변수 U 를 固定한 狀態에서 운전변수 X 를 最適化하는 問題를 생각한다. 이때 초기 投資變數 U_0 의 선정은 손쉽게 구할 수 있다.

$$\text{Minimize } C_x^T X \tag{12}$$

$$\text{s. t. } Ax \leq b_1 - Bu_0 \tag{13}$$

이 問題는 실제로 여러가지 부하수준에 대한 運轉變數를 모두 包含한 문제이다. 그러나 投資變數를 固定하였을 경우에 運轉模型은 개개의 부하수준에 대한 운전모형을 獨立的으로 풀 수 있다. 따라서 各各의 최적 운전모형은 오직 하나의 負荷水準에 대한 運轉變數만을 包含하게 되어 變數의 數가 大幅 감소하게 되며 이로인하여 계산시간과 기억용량을 줄일 수 있다. 최적화하게 되면 그 결과 最適點에서 拘束制限條件數는 變數의 수와 같게 된다. 따라서 原問題의 制限條件式은 다음과 같은 두가지 분류로 分類될 수 있다.

$$AaX + BaU = b_1 a : \text{구속 제약조건} \tag{14}$$

$$AnX + b_n U \leq b_1 n : \text{비 구속 제약조건} \tag{15}$$

다음은 原 問題를 편차를 變數로 하는 새로운 문제로 표현하여 보자 이때 주어질 값들은 變數 X_0 와 U_0 의 초기치이다.

變數의 값들은 다음과 같은 편차들로 나타낼 수 있다.

$$X = X_0 + \Delta X \tag{16}$$

$$U = U_0 + \Delta U$$

원 문제는 식(16)을 使用하여 다음과 같이 定理된다.

$$\text{Minimize } C_x^T \Delta X + C_u^T \Delta U + K \tag{17}$$

$$\text{s. t. } Aa\Delta X + Ba\Delta U = 0$$

$$An\Delta X + Bn\Delta U \leq b_{1n} - AnX_0$$

$$-BnU_0 D\Delta U \leq b_2 - Du_0 \tag{18}$$

式 (18)을 利用 ΔX 를 소거하면 ΔU 만의 함수로 표현할 수 있다. 그리고 X 의 최적화 結果에서 얻은 雙對變數 값을 λ_x 로 표시하면 變形된 최적화 문제는 다음과 같다.

$$\lambda_x = -Aa^{-T}c_1 \quad (19)$$

$$\text{Minimize } [\lambda_x^T Ba + Cu^T] \Delta U \quad (20)$$

$$\begin{aligned} s. t \quad & -(AnAa^{-1}Ba + Bn) \Delta U \leq b_1 n \\ & -A_n X_0 - B_n U_0 \\ & \Delta U_0 \leq b_2 - Du_0 \end{aligned} \quad (21)$$

이 문제의 최적해에 대한 쌍대변수 값을 λ_u 로 나타내고 원 문제에 대한 실제 쌍대변수 값을 나타내면 다음과 같다.

$$\lambda_u = -[-AnAa^{-1}Ba + Bn]^{-T} [\lambda_x^T Ba + Cu^T]^T \quad (22)$$

$$\lambda_{xu} = \begin{bmatrix} \lambda_x - Aa^{-T}An^T \lambda_u \\ \lambda_u \end{bmatrix} \quad (23)$$

식 (23)은 행렬의 역행렬 정리(Matrix Inversion Lemma)에 의해서 얻을 수 있다. 따라서 변형된 최적화 문제 식 (20), (21)을 풀게 되면 그로부터 본래 문제의 쌍대값을 구할 수 있으며 이들 값들이 모두 양의 값을 가지지 않고 일부가 음의 값을 갖게 되면 이 경우에는 새로운 작용 집합 Aa , Ba 를 구성하여 다시 반복하여 λ_x , λ_u , λ_{xu} 를 구한다.

이상의 알고리즘을 사용하면 운전모형과 투자모형을 각각 손쉽게 풀수 있게되고 계산시간과 기억용량을 줄일 수 있다. 그리고 운전모형은 반복 계산과정에서 변화된 투자량을 사용하여 다시 최적운전을 결정하게되며 이는 투자량의 결정이 운전에 정확히 반영되고 있음을 나타낸다.

3.2 運轉模型의 分割

최적운전모형은 유효전력 최적화와 무효전력 최적화를 함께 포함하고 있다. 그러나 계통의 특성을 활용하여 유효전력, 무효전력最適화를 分割하여 處理하게 되면 좀 더 効率的인 계산을 遂行할 수 있다. 다음은 이를 爲한 최적운전모형의 분할 알고리즘을 보여준다.

3.2.1 有効電力 最適化

有効電力最適化는 參考文獻[7~9]에서와 같이發電機 有効出力을 變數로 하는 最適化 模型으로 표현된다. 이는 一般的으로 많이 採用되고 있는 損失最適化問題보다 現實性이 있고 또한 運轉費用의 節減面에서 더욱 合理的 方法으로 인정되고 있다.

$$\text{Minimize } Cp_i = F(i, s, t) \quad (4)$$

$$\begin{aligned} s. t \quad & g(p_{sg}) = 0 \\ & \underline{P}_{sg} \leq P_{sg} \leq \overline{P}_{sg} \\ & h(\theta) \leq \bar{h} \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 P_{sg} : 基準母線을 包含한 발전기 有効電力 출력 벡터이다. 이 알고리즘은 발전기의 有効電力만이 變數로 취급되고 있다. 따라서 전체 變數의 수는 대단히 감소하게 되고 계산시간은 실시간 운전에 적합할 수 있을 정도로 빠르게 된다.

3.2.2 無効電力 最適化

無効電力最適化 알고리즘은 유효전력의 경우보다 상당히 複雑하다. 왜냐하면 無効電力이 電壓의 複雑한 함수로 表示되기 때문이다. 그리고 목적함수는 本來 系統의 運轉費用을 取하여야 하지만, 本論文에서는 이를 有効電力의 最適化時 얻어진 情報를 使用함으로써 좀 더 効率的인 方法을 導入하였다. 系統의 運轉費用은 유효전력만에 의해서 發生하므로 無効電力最適時間에도 運轉費用을 考慮하기 위하여서는 有効電力最適化 模型에서 需給條件을 考慮함으로써 可能할 것이다. 즉 有効電力最適化時의 需給條件을 導入하여야 함을 意味한다.

그리고 有効電力最適化時에도 無効電力 또는 電壓 絕對值의 變化에 의한 影響을 고려하도록 하여야 한다. 따라서 無効電力最適化의 目的 函數는 有効電力·最適化의 需給條件을 變化시키는데 따른 運轉費의 變化인 쌍대변수 값을 使用하여야 한다. 무효전력 최적화 알고리즘[8]은 다음과 같다.

$$\text{Minimize } Cg = Fg(v, t) = -\alpha [J_b v + J_t n] \quad (24)$$

$$\begin{aligned} s. t \quad & \underline{Q}_{sgc} \leq Q_{sgc} \leq \overline{Q}_{sgc} \\ & \underline{v} \leq v(Q_{sgc}, n) \leq \bar{v} \\ & \underline{n} \leq n \leq \bar{n} \\ & h(v, n) \leq \bar{h} \end{aligned} \quad (25)$$

여기서

- $Fg(v, t)$: 無線電力最適化에 의하 運轉費의 變化量
- λ : 有効電力最適化의 需給 方程式에 대한 쌍대변수 값
- Jb : 電壓變化에 따른 有効電力 變化量 行列
- Jt : 變壓比 變化에 따른 有効電力 變化量 行列

有効電力 最適化와 無効電力 最適化에 모든 方程式은 偏差方程式으로 변환하여 다루게 된다. 이와 같은 作業에 依하여 계산의 效率性을 높일 수 있었으며 投資모형을 分割할 수 있는 方法이 導入에 成功하였다.

4. 計算 알고리즘

다음은 위에 설명한 分割方法을 利用 最適 無効電力設備 計劃의 순 알고리즘을 說明하는 것이다. 즉 投資模型을 운전모형과 투자모형으로 분할하여 계산을 수행하였다. 그리고 運轉 모형에서도 유효전력과 무효전력 최적화 문제를 分割하여 計算의 效率性을 向上시켰다.

1. 초기 投資量 U_0 를 許容範圍의 값으로 指定한다.
2. 負荷水準別 最적운전모형을 求하고 그 結果 λ_x 들을 구하고 이때의 구속제약조건들의 投影行列을 求한다.

3. 投資模型 最適化를 最適運轉 정보들을 使用하여 수행한다.
4. λ_u 와 λ_x 로부터 식 (23)을 使用하여 원 문제의 λ_{xu} 를 구한다.
5. 만약 모든 λ_{xu} 가 양(+)의 값을 가지면 計算을 종료한다.
6. 수렴하지 않은 경우에는 λ_{xu} 중에서 음인 구속제약조건들을 λ_u 의 구속제약조건들과 교환하여 투영행렬을 수정한다.
7. 모든 運轉變數와 投資變數 값을 修正하고 다시 3부터 反復한다.

본 알고리즘의 계산과정은 그림 1에 보였다. 흐름도에서 最適化課程은 3에서 行해진다. 즉 最適運轉의 모듈의 有効電力과 無効電力 最適化와 投資模型 最適化가 3에서 遂行된다. 여기서는 프로그램의 간편성과 통일성을 期하기 爲하여 모두 傾斜投影法[10]을 使用하였다.

5. 事例研究

本 研究의 타당성을 檢證하기 위하여 IEEE-14 母線 系統에 適用하였다. 負荷水準은 尖頭負荷, 基底負荷로 나누었으며 後者は 電子의 50%로 假定하였다.

年度別 負荷 成長率은 每年 10%로 가정하였다. 表1은 尖頭負荷時의 年度別 초기조류 계산과 最적운전 후 變數의 最終상태를 나타낸다.

초기 조류 계산에서는 母線電壓이 下限値 以下로 된 母線이 많았으나 無効電力設備 投資 및 調整變數의 調整으로 制限 範圍內에 들어갈 수 있을 을 알 수 있다.

表 2는 初期 年度 尖頭負荷時 母線의 정보를 나타내고 表 3은 發電機의 연료비 係數를 나타낸다.

表 4는 反復計算에 의하여 發電變數費와 無効電力 投資費의 變化를 나타내며 全體費用이 감소됨을 보여주고 있다. 表 5는 年度別로 無効電力 設備 投資量을 나타낸다. 年度別로 독립적으로 投資變數와 運轉變數의 最適 解를 求할 수 있는 것은 最大原理를 利用하여 람다 情報를 利用하기 때문이며 分割法의 導入은 계산기의 기억용량과 계산시간을 短縮하기 爲함이다.

6. 結 論

이 論文에서 無効電力 設備 補償에 關한 새로운 方法이 提示되었다.

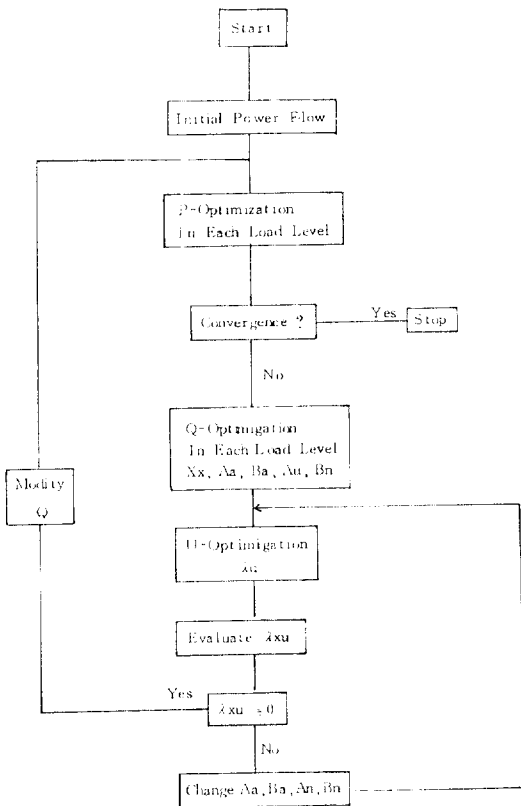


그림 1 Algorithm의 흐름도
Fig. 1 Flow Chart of the Algorithm

표 1 14-모선계통 침투부하시 효율성 검증

Table 1 Efficiency Test for the 14-bus system for peak load

Variables	Limits		First Year		Second Year		Third Year	
	Lower	Upper	Initial state	Final state	Initial state	Final state	Initial state	Final state
$P_1[MW]$	0.0	266	196.6	98.8	218.0	109.8	241.6	122.5
$P_2[MW]$	0.0	67	40.0	34.6	44.0	37.9	48.4	41.7
$P_3[MW]$	0.0	78	30.0	77.8	33.0	77.8	36.3	77.8
$P_6[MW]$	0.0	89	20.0	48.4	22.0	56.7	24.2	66.4
$P_8[MW]$	0.0	67	30.0	49.6	33.0	58.5	36.6	66.7
$Q_1[MVAR]$	-50	200	-16.2	35.6	-7.5	40.5	111.2	34.2
$Q_2[MVAR]$	-40	50	42.6	-15.5	50.0	-15.5	50.0	-15.0
$Q_3[MVAR]$	0.0	40	40.0	11.4	40.0	11.9	40.0	12.3
$Q_6[MVAR]$	-6.0	50	50.0	35.7	50.0	37.2	50.0	35.5
$Q_8[MVAR]$	-6.0	50	19.6	8.4	25.8	2.9	33.9	19.7
$v_1[p, u]$	0.95	1.05	1.01/0.0°	1.04/0.0	1.01/0.0°	1.04/0.0°	1.01/0.0°	1.04/0.0°
$v_2[p, u]$	0.95	1.05	1.01/-4.6°	1.01/-1.7°	1.00/-5.0°	1.01/-1.9°	0.99/-5.5°	1.02/-2.2°
$v_3[p, u]$	0.95	1.05	0.99/-11.0°	1.00/-4.0°	0.97/-12.3°	0.99/-4.8°	0.96/-13.6°	0.99/-5.8°
$v_4[p, u]$	0.95	1.05	0.97/-9.5°	1.00/-4.5°	0.96/-10.6°	1.00/-4.9°	0.94/-11.7°	1.00/-5.6°
$v_5[p, u]$	0.95	1.05	0.97/-8.6°	1.00/-4.2°	0.96/-9.4°	1.00/-4.5°	0.94/-10.4°	1.01/-5.0°
$v_6[p, u]$	0.95	1.05	0.98/-14.7°	1.03/-6.5°	0.96/-16.4°	1.03/-6.7°	0.93/-18.4°	1.04/-6.8°
$v_7[p, u]$	0.95	1.05	0.97/-11.1°	0.99/-3.8°	0.96/-12.4°	0.99/-3.8°	0.94/-13.8°	1.01/-4.1°
$v_8[p, u]$	0.95	1.05	1.00/-8.0°	1.00/1.2	1.00/-8.9°	0.99/2.3°	1.00/-9.9°	1.04/2.3°
$v_9[p, u]$	0.95	1.05	0.45/-14.0°	0.99/-6.6°	0.93/-15.7°	0.99/-6.9°	0.91/-17.6°	1.01/7.5°
$v_{10}[p, u]$	0.95	1.05	0.93/-15.2°	0.98/-7.7°	0.91/-17.0°	0.99/-8.3°	0.89/-19.2°	1.01/-8.9°
$v_{11}[p, u]$	0.95	1.05	0.93/-15.9°	0.99/-8.1°	0.91/-17.8°	1.00/-8.9°	0.88/-20.1°	1.02/-9.6°
$v_{12}[p, u]$	0.95	1.05	0.93/-16.3°	0.99/-8.1°	0.91/-18.2°	0.99/-8.4°	0.88/-20.5°	0.99/-8.7°
$v_{13}[p, u]$	0.95	1.05	0.95/-15.7°	1.02/-8.0°	0.93/-17.6°	1.01/-8.2°	0.90/-19.8°	1.01/-8.3°
$v_{14}[p, u]$	0.95	1.05	0.93/-15.6°	0.98/-8.0°	0.91/-17.5°	0.98/-8.3°	0.88/-19.7°	0.99/-8.7°
System Loss[MW]			11.60	4.12	14.26	4.94	17.70	5.89
Generation Cost[\$/hr]			723.963	585.067+0.532 =585.599	849.246	672.687+1.247 =673.934	17.7° 998.574	775.416+0.988 =776.404

표 2 14-모선계통에 1차년도 기준부하

Table 2 Basic Load in the 14-Bus System of the first year

Bus Number	Generation		Load		Bus Number	Generation		Load	
	P(MW)	Q(MVAR)	P(MW)	Q(MVAR)		P(MW)	Q(MVAR)	P(MW)	Q(MVAR)
1	0.0	0.0	0.0	0.0	8	30.0	17.40	0.0	0.0
2	40.0	42.4	21.7	12.7	9	0.0	0.0	20.5	10.6
3	30.0	23.4	94.2	19.0	10	0.0	0.0	20.0	10.8
4			47.8	-3.9	11	0.0	0.0	20.5	10.8
5			27.6	11.6	12	0.0	0.0	20.1	10.6
6	20.0	12.2	11.2	7.5	13	0.0	0.0	10.5	5.8
7					14	0.0	0.0	10.9	5.0

無効電力 設備 計劃은 年度 別 최적해를 求하는 動的 시스템의 最適制御 問題로 볼 수 있기 때문에 最大原理가 利用되었다.

또한 計算時間과 計算機의 記憶容量을 줄이기 爲하여 한 負荷水準에서의 運轉變數와 投資變數를 同時에 變數로 取扱하지 않는 分割法이 利用되었다.

이 프로그램은 計算機 記憶容量을 줄이기 爲하여 行列의 疎行列技法을 利用하였다. 이 프로그램은 調相設備의 計劃뿐만 아니라 系統의 最適運用에도 利用될 수 있다. IEEE 14, 30 母線에 適用하여 그 効用性이 立證되었으나 大形 實系統에 利用하기 爲하여 앞으로 더 研究되어야 한다고 생각된다.

표 3 연료비 계수

Table 3 Coefficient of fuel cost

Bus Number	A	B	C
1	0.0	1.750	0.0175
2	0.0	1.00	0.0625
3	0.0	3.25	0.00834
6	0.0	3.0	0.025
8	0.0	3.0	0.025

표 4 14-모선계통의 1차년도에 투자비수렴특성

Table 4 The planning cost convergence characteristics for the first year's load of the IEEE 14-Bus system

Iteration No	Operation Cost (\$/hr)	Investment cost (\$/hr)	Total cost (\$/hr)
1	820.332	3.852	824.184
2	820.219	0.074	820.293
3	819.004	1.343	820.347
4	820.290	0.436	820.727
5	820.311	0.621	820.932
6	820.263	0.532	820.795

표 5 연도별 무효전력 설비 계획

Table 5 Distribution of New Reactive Power Compensation

Bus Number	Scheduled New Reactive Power Compensation [MVAR]				
	Year	1	2	3	Total
10		7.3	42.3	10.5	60.1
11		2.9	17.9	17.5	38.3
13		16.6	0	19.0	35.6

참 고 문 헌

[1] G.S. Vassel, Raymond M Maliszewski, N.B.

Johnson "Experience with the AEP 765KV System : Part- II -system performance" IEEE PAS-92 pp. 1337-1347, July/August 1973.

[2] A. Kishore and E.F. Hill, "Static Optimization of Rective Power Source by use of Sensitivity Parameters," IEEE PAS-90, pp. 1163-1173, 1971.

[3] S.S. Sachdeva, R. Billington, "Optimal Network Var Planning By Nonlinear Programming," IEEE PAS-92 pp. 1217-1225, 1973.

[4] H.H. Happ, K.A. Wirgan, "Static and dynamic var Compensation In System Planning," IEEE PAS-97 No. 5 pp. 1564-1578, Sep/Oct. 1978.

[5] A. Hughes, R.R. Schoultz, "Optimal Reactive Power Planning," IEEE PAS-100, No. 5, pp. 2189-2169, May 1981.

[6] W.M. Lebow, R. Rouhani, R. Narita, "A Hierachical Approach To Reactive Volt Ampere(VAR) Optimization In System Planning", IEEE PAS-104 No. 8, pp. 2051-2057. Aug. 1985.

[7] K.Y. Lee, J.L. Ortiz, Y.M. Park, "An Optim-ization Technique for Reactive Power Plan-ning of Subtransmission Network Under Normal Operation," IEEE PAS-Vol. PWRS-1, No. 2, pp. 153-159, May 1986.

[8] K.Y. Lee, Y.M. park, "Optimal Operation of Large-scale Power Systems," IEEE Transac-tions on power systems Vol. 3, No 2, pp. 413-420. 1988.

[9] K.Y. Lee, Y.M. Park, "A United Approach To Optimal Real and Reactive Power Dispatch." IEEE PAS-104, pp. 1147-1153, 1985.