

系統電壓 無効電力 總合制御에 관한 基礎研究

(A study for the Integrated Control of System Voltage and Reactive Power)

宋 吉 永*
(Song Kil Yeong)

Abstract

As a power system gets complicated and the number of regulating points increases, the voltage reactive power control tends to be more complex and more difficult. In the past, we took only the voltage regulation into account for this voltage control problem. pay attention not only to the voltage regulation but also to the rational system operation which minimizes transmission losses.

considering the rehuirements mentioned above we aim developing a method of coordination of these regulating equipments and also present some preliminary discussions about computer control of power systems which is now frequently available with the progress of digital Computer technique.

序 論

電力系統의 電壓無効電力制御는 系統運用技術에 있어서의 重要課題의 하나로서 現在 各電力會社에서도 銳意 研究中에 있다.⁽¹⁾

本研究는 東京電力에 있어서의 電壓無効電力總合制御 方式確立의 第一步로서 火力關連의 275 KV 超高壓送電 系統에 着目하여, 앞으로 여기에 採用시킬 適切한 制御 方式에 對한 檢討를 行한 것이다⁽²⁾

內容은 制御方式의 開發과 電壓無効電力總合制御適用에 關한 檢討의 兩者로 大別되나(前者에 對하여서는 앞서 最適運轉狀態(Pattern)決定이라는 觀點에서 檢討하였기 때문에⁽³⁾⁽⁴⁾ 本文에서는 主로 後者의 檢討 內容을 報告하고자 하는 바이다.

2. 電壓無効電力制御의 總各自動化的 構想

電壓無効電力의 總合制御라고 하는것은, 多數의 變電所. 및 發電所를 包含한 廣範圍한 系統을 綜合하여 協調 制御하는 것을 말한다.⁽⁵⁾

곧 系統內의 必要한 制御量, 例를들면 各變電所의 二次電壓, 連絡送電線의 無効電力 등을 情報源으로 하여, 이에 對備된 各處의 電壓調整設備를 適切히 制御 하는 것이다.

그 結果 現在의 系統電壓制御方式이 가지는 여러가지 問題點, 곧

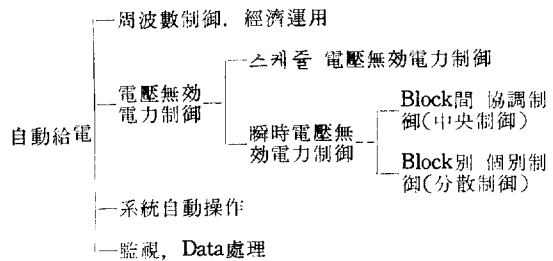
- (1) 餘剩無効電力에 關한 問題點
- (2) 各發, 變電所 相互間의 協調運用에 關한 問題點
- (3) 系統全體로 본 合理的인 系統運用 實現에 關한 問題點

등을 解決함과 同時, 高度化 되어가는 需要家の 電壓 Service Level을 維持하고, 系統運用의 經濟性을 한층 더 期待할 수 있게 될 것이다.

이러한 觀點에서 現在 各電力會社에서는 自動給電方式의 一環으로서의 電壓無効電力制御의 自動화를 推進 하고 있다.⁽¹⁾

表 1은 自動給電體系의 概要이며, 이것을 좀 더 具體的으로 보인것이 그림 1의 總合自動化的에 關한 結合 Block圖이다.

表 1 自動給電의 體系



이와같은 總合自動化的의 中心을 이루고 있는것은 電子 計算機이며, 現在 大部分의 電力會社에서는 事務經營計算과 別途로 經濟運用計算을 主目的으로 한 電子計算機를 設置하고 있으나 한걸음 더 앞서 系統運用의 總合自

*早稻田大學 大學院 電力工學 研究室. 正會員.

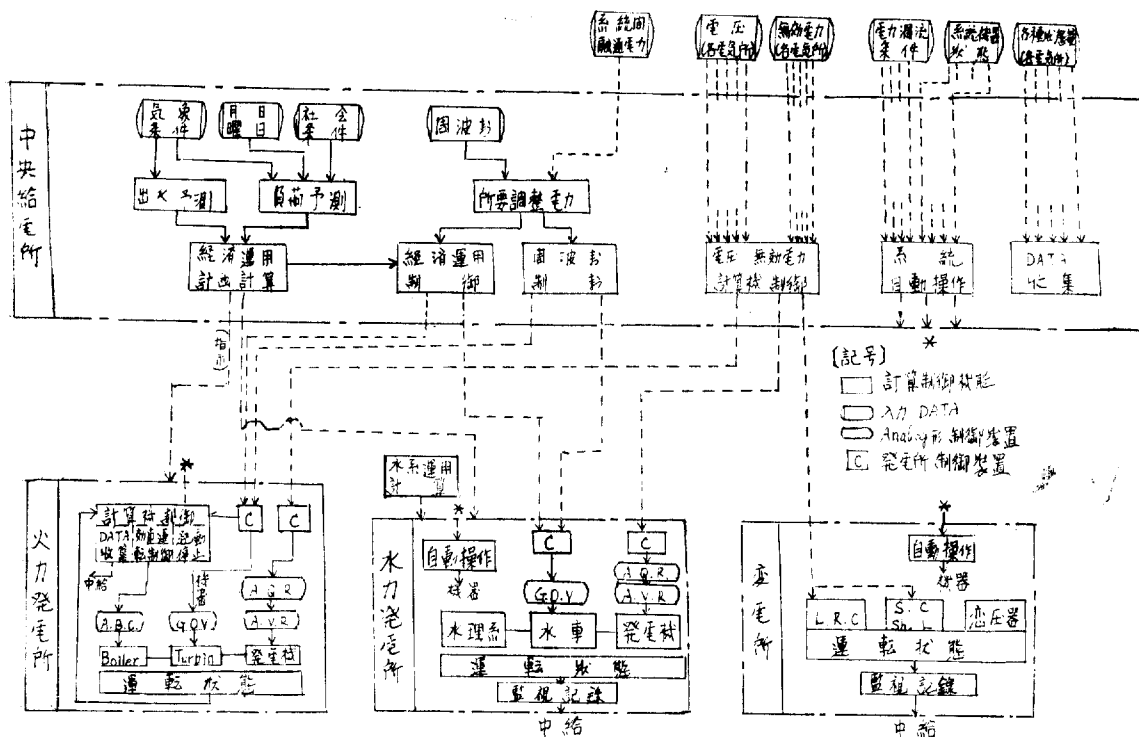


그림 1. 系統運用的 綜合自動化에 關한 結合 Block 圖

自動化를 目標로한 電子計算機設置의 構想을 가지고 있다.

특히 이것을 綜合自動化用的 專用計算機로 할것인가, 또는 事務, 經營 全體를 包含한 超大型電子計算機로 할것인가에 對해서는 將來의 事業全體에 걸친 I.D.P.S (Integrated Date Processing System) 構想과 더불어 決定되어야 할 것이다.

2. 東京電力超高压系統의 總合制御方式에 關한 檢討

3.1 規定系統 및 系統條件

1. 規定系統

將來의 東京電力超高压系統에 對한 計算機制御適用의 可能性과 그 效果를 살피고 同時에 總合的인 制御方式에 對한 指針을 얻기 爲하여 東京電力給電關係의 後援을 얻어 1967年度의 超高压系統을 對象으로 計算을 實施하였다.

對象時點으로서는 1967年 12月의 重負荷時 및 輕負荷時를 選定하였는데, 이때의 需要電力은 重, 輕負荷時 各 各 1,047 萬 KW, 438.7 萬 KW 가 될 것으로 豫想되고 있다.

그림 2는 計算한 이때의 系統構成圖로써 17機 49Node 의 規模로 되고 있다.

2. 調整機器

電壓無効電力調整機器의 對象은 發電機, 調相設備 및

負荷時電壓調整器로 되고 있다.

이中 發電機는 負荷端에 가까운 5個所의 火力發電所 (橫須賀 1, 2 千葉, 五井 및 姉崎)와 6個所의 水力發電所 (奧只見系, 信濃川, 矢木澤, 東北系 및 佐久間發電所) 의 計 10個所를 選定하여 各 各 無効電力出力 20 MVAR 을 操作單位量으로 取扱하였다.

調相設備로서는 二汚系統에 發電力이 있는 8個所의 超高压變電所(中東京, 南川越, 西東京, 京浜, 東富士, 北東京, 東東京 및 房總變電所)만을 對象으로 總容量 6,040 MVA에 達하는 靜止型 콘덴사(SC), 分路 리알틀 (Sh.R) 및 로타리 콘덴사(RC)를 하나의 調整機器로써 取扱하였다.

但 調相設備의 單位操作量에 있어서는 既設된 單位容量(Bank Capacity)에 따라 25, 30 및 40 MVAR 의 各種으로 되고 있다.

負荷時電壓調整器(LRC)로서는 역시 2次系統에 發電力이 있는 超高压變電所中에서 LRC를 가진 6個所(中東京 京浜, 東富士, 北東京, 東東京 및 房總變電所) 및 LRC를 가진 橫須賀火力發電所를 調整의 對象으로 하였다.

3. 系統特性定數

計算에 所要되는 系統特性定數는 그림 2의 系統의 基本潮流狀態에서 各調整機器를 單位量 操作시켰을 때의 潮流狀態를 反復計算함으로써 算出하였다. (6)

表 2는 그 1例로써 各變電所의 LRC 및 調相設備를 各

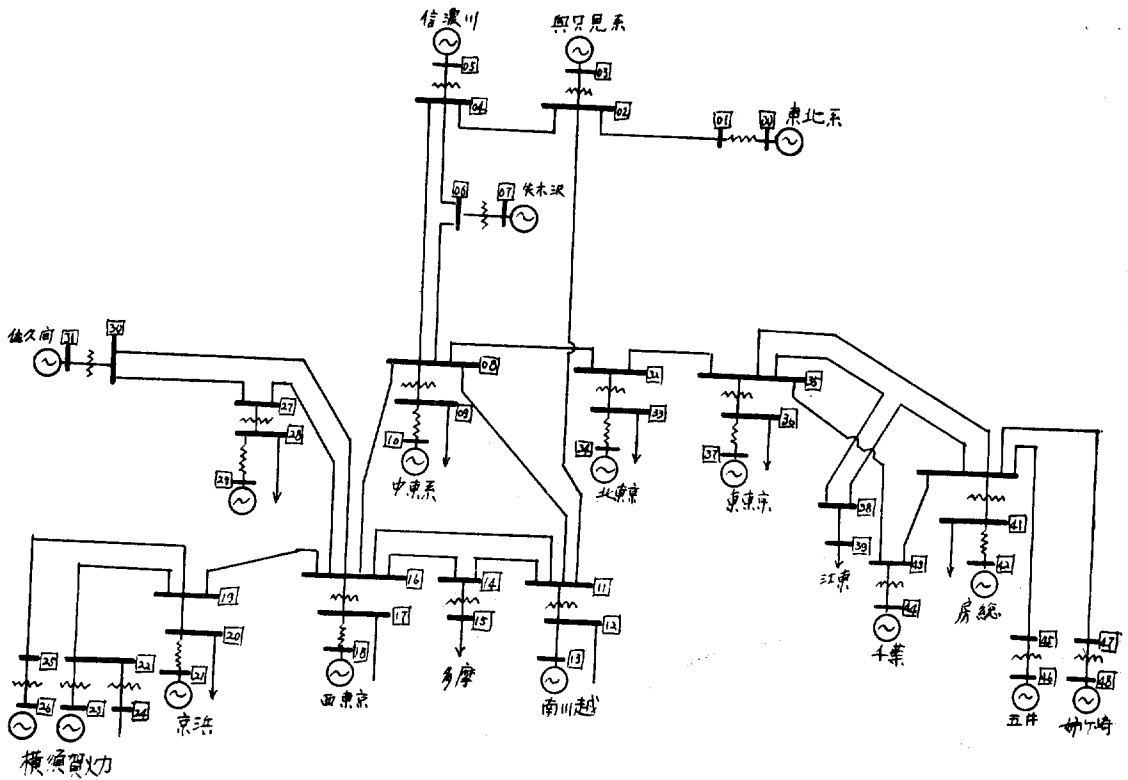


그림 2 東京電力超高壓系統

表 2 系統特性定數 (1) LRC : 2TAP → 單位操作量 SC : BANK 容量 → 操作量 (25, 30, 40 MVAR)

制作點 操作點	房總 N 1	東東京 N 2	北東京 N 3	中東京 N 4	京浜 N 5	東富士 N 6	江東 SC 1	東東京 SC 2	北東京 SC 3	中東京 SC 4	南川越 SC 5	西東京 SC 6	京浜 SC 7	東富士 SC 8
△V ₁ (房總)	0.641	-0.037	-0.055	-0.018	-0.024	0.0000	0.050	0.025	0.025	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
△V ₂ 江東	-0.928	-0.183	-0.220	-0.147	-0.097	-0.018	1.350	0.125	0.075	0.025	0.040	0.030	0.000	0.040
△V ₃ 東東京	-0.183	-0.630	-0.220	-0.147	-0.097	-0.018	0.125	0.375	0.075	0.025	0.040	0.030	0.000	0.040
△V ₄ 北東京	-0.110	-0.110	1.356	-0.018	-0.146	-0.018	0.075	0.078	0.275	0.025	0.080	0.030	0.000	0.040
△V ₅ 中東京	-0.037	-0.037	-0.092	0.879	-0.146	-0.018	0.025	0.025	0.025	0.225	0.080	0.030	0.025	0.040
△V ₆ 南川越	-0.055	-0.055	-0.147	-0.293	-0.268	-0.035	0.025	0.050	0.050	0.050	0.560	0.060	0.025	0.080
△V ₇ 多摩	-0.055	-0.055	-0.128	-0.275	-0.390	-0.025	0.025	0.025	0.050	0.050	0.160	0.060	0.025	0.080
△V ₈ 西東京	-0.018	-0.018	-0.055	-0.128	-0.268	-0.035	0.025	0.025	0.025	0.025	0.080	0.390	0.025	0.080
△V ₉ 京浜	-0.018	-0.018	-0.037	-0.073	-0.999	-0.018	0.000	0.000	0.025	0.025	0.040	0.030	0.020	0.040
△V ₁₀ 東富士 横須賀	-0.018	-0.018	-0.055	-0.128	-0.268	1.365	0.025	0.025	0.020	0.025	0.080	0.060	0.020	1.280
△V ₁₁ 局配	-0.018	-0.018	-0.055	-0.128	-0.438	-0.035	0.025	0.025	0.025	0.025	0.080	0.060	0.050	0.080

各單位量操作하였을 때의 監鉛點·電壓의 變化分을 보인 것이다.

本計算에서는 發電機의 運轉方式에 따라 다음과 같은 두가지의 系統規模를 생각하고 있다.

(A) 發電機의 無効電力出力을 協調시킨 경우 :

- 電壓 監視點 11
- 無効電力監視線路數 19
- 調整設備의 操作點 24

(B) 發電機의 協調가 없을 경우 :

- 電壓監視路 11
- 無効電力監視線路數 19
- 調整設備의 操作點 14

4. 外亂條件

御方式의 檢討로서는 適當한 外亂을 주어 그 結果 생기는 電壓 및 無効電力潮流偏差에 對하여 各調整設備을 制御目的에 따라 操作시킨다는 方針에서 計算하기로 하였다. 따라서 本計算에서는 外亂條件으로서 超高壓變電所에 電壓變動을 주기로 하였으나, 그 크기는 現在의系統運用實績을 考慮하여, 特히 系統의 西地域에서의 電壓上昇現象에 注目하여 表 3과 같은 數種의 케이스를 想定하였다.

이 外에 制御에 따른 系統狀態의 움직임을 보기 위하여 時系列的인 外亂을 數種 考慮하였다.

		케스 1	케스 2	케스 3	케스 4
房	總(變)	+2.0	+2.0	0	-2.0
中	東 京(//)	+2.0	+1.5	0	-2.0
京	濱(//)	+2.0	+3.0	+2.0	-2.0
東	富 士(//)	+3.0	+5.0	+4.0	-4.0

3.2 計算方法 및 計算結果

計算方法으로서는 앞서 報告한 Search 法에 의한 反復 計算法을 採用하였다. (4)

먼저 發電機의 無効出力의 協調가 없는 경우의 計算 結果를 그림 3 및 그림 4에 보인다. 同 그림에서 볼 수 있는바와 같이 想定된 各 케이스의 外亂에 對하여 20~30 回 程度의 反復計算으로 最終的인 結果에 列達하고 있다. (但 여기서는 許容偏差 $E_{vi} = \pm 1.0\%$ 로 함)

다음 發電機의 無効電力出力까지를 計算機制御할 경우의 計算例를 그림 5에 또 이것과 發電機無制御의 경우와의 比較를 그림 6에 보인다. 여기서는 發電機의 無効電力出力 20MVAR을 單位操作量으로 離散化 시켜 LRC, SC 등과 함께 取扱하고 있다. 앞서 系統特性定數算出時에 밝혀졌지만, 發電機 無効電力出力操作이 超高壓變電所의 電壓變化에 주는 영향은 極히 작은 反面 發電所와 接續되는 送電路線의 無効電力潮流에 對해서는 相當히 큰 영향을 미치고 있기 때문에 그結果 그림 6의 計算例에 보는바와 같이 發電機까지 包含한 計算機制御의 效果가 크게 나타나고 있다.

그림 7은 外亂을 時系列的으로 두었을 때의 制御結果의 一例이다. 여기에서 볼 수 있는 바와같이 適當한 制

御의 實施에 따라 언제나 系統電壓을 許用運配範圍內에 또 無効電力潮流의 適正化에 따른 送無損의 輕減을 이룰 수 있을 것이다.

다만 이러한 케이스에서 問題가 되는 것은 外亂, 特히 電壓의 變動特性이며 또 이에 따른 豫測制御問題인 것

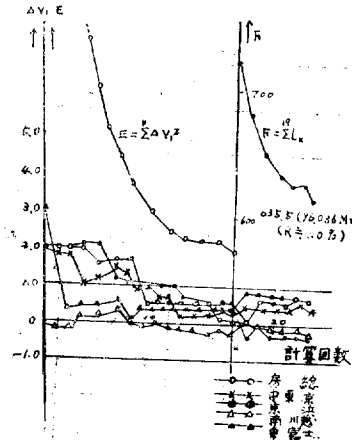


그림 3. 瞬時制御의 收束過程(케스 1)
[初期狀態 $X_{j0}=0$]

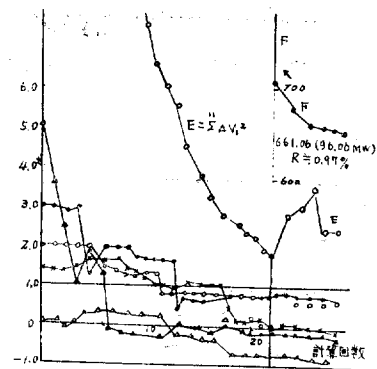


그림 4. 瞬時制御의 收束過程(케스 2)
[初期狀態 $X_{j0}=0$]

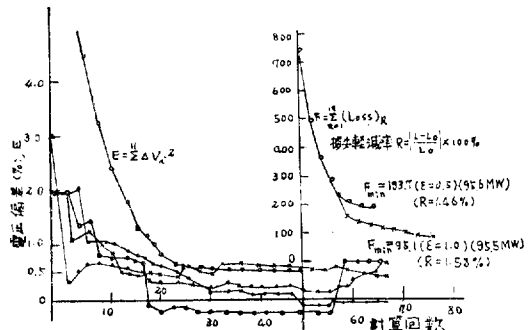


그림 5. 瞬時制御의 收束過程
($n=11, l=19, m=24, E_{vi}=\pm 0.5\%, 1.0\%$)

이다.

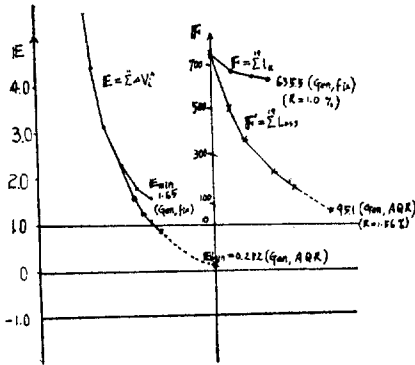


그림 6. 發電機 · 無効電力制御有無의 比較

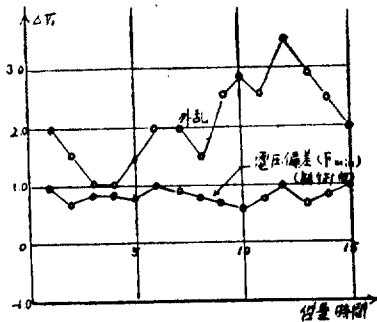


그림 7(a). 瞬時制御의 1例(外亂은 時系列)

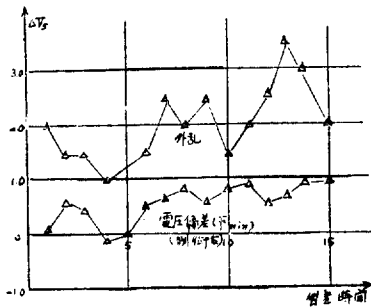


그림 7(b). 瞬時制御의 1例(外亂은 時系列)

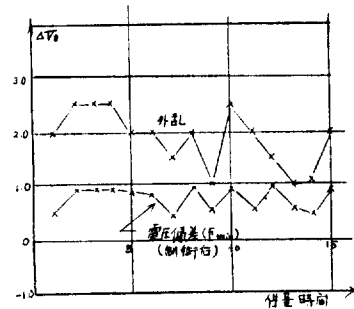


그림 7(c). 瞬時制御의 1例(外亂은 時系列)

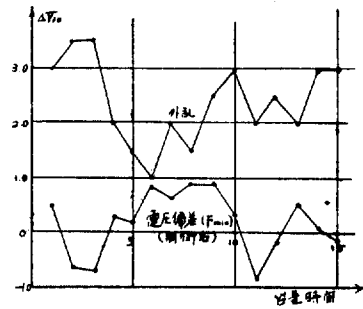


그림 7(d). 瞬時制御의 1例(外亂은 時系列)

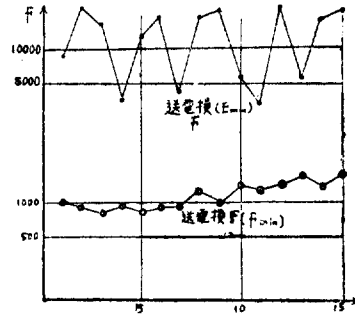


그림 7(e). 瞬時制御後의 損失分布

3.3. 計算機制御에 對한 檢討

1. 計算方法의 選定

前述한 바와 같이 現在 開發된 여러가지 計算法中에서 筆者가 開發한 Search 手法⁴⁾이 가장 有用한 것으로 生覺되었기에, 本節의 實用系統의 計算에서도 이 方法을 採用하였다.

計算에 使用된 對象系統의 規模는 監視點 30, 擧作點 24로 이루어지는 比較的 큰 것이었으나 모든 計算케이스에 對한 本法의 收束性이 極히 善았고, 所要計算時間도 IBM 7090로서 40秒 정도였다.

勿論 이와 같은 計算은 系統特性定數의 크기, 冪 調相設備의 單位操作量 및 發電機無効電力出力을 離散化하는 크기에 따라 어느 정도 左右될 것이나, 現在 開發되고 있는 制御用計算機의 性能으로 보아, 本 Search 手法의 適用으로 將來의 計算機制御實現이 有望한 것으로 生覺되고 있다.

2. 發電機까지 包含한 計算機制御의 實施에 對하여

系統內의 調相設備(LRC 包含)뿐만 아니라, 發電機의 無効電力出力制御까지 包含한 總合的인 計算機制御를 實現함으로써, 보다 微細한 電壓制御 및 送電損의 輕減化를 達成시킬 수 있을 것이다. 最近에는, 系統의 需要點에 近接하여 火力發電所가 建設되고 있기 때문에 特別히 이를 火力發電所의 積極的인 制御參加가 要望되고 있다.

그림 8에 보인 바와 같이 今般 越高壓系統에서는 調

相設備(LRC 包含)의 制御만으로는, 初期의 送電損에 對하여 約 1.0%의 損失輕減이 可能하였으나, 여기서 다시 發電機의 無効電力까지 積極的으로 制御에 參加시킨 결과 이것을 1.5%까지 높일 수 있었다.

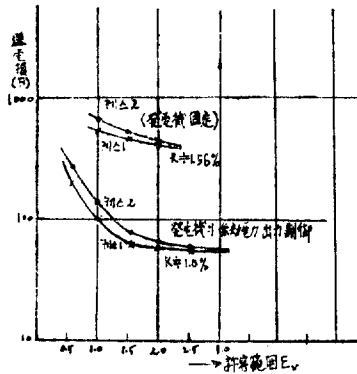


그림 8. 發電機의 制御效果

한편 發電機까지 包含한 總合制御時의 所要計算後間은 調相設備만 考慮하는 경우보다 2~3 倍에 이르고 있으나, 그래도 前述한 바와 같이 全體로서 約 40 抄 정도에 不過하기 때문에, 將來 On-line Control을 目標로 하는데에 이 점은 別問題가 없을 것으로 生覺된다.

3. 送電損의 輕減效果

電壓, 無効電力의 計算機制御를 實施한 경우의 送電損輕減效果를 檢討하기 위하여, 다음 條件에 따라 比較하였다.

- (1) 電壓, 無効電力의 變動을 許容範圍內에 維持할 경우(發電機運轉方式: AVR)
- (2) 電壓, 無効電力의 變動을 許容範圍內에 維持해과 同時, 送電損의 最小化까지 해께 參考할 경우(發電機運轉方式: AQR)

이번 Model 計算에 의하면, 送電液輕減效果는 1967 年度의 超高壓系統에 있어서 年間 2,000~3,000 萬圓정도 期待될 것이 確認되었다²⁷⁾.

곧 計算結果에 依하면, 計算機制御에 따른 年間 損失輕減效果는

- (1)의 경우: 2,280 萬圓/年
- (2) // : 3,420 萬圓/年

但 送電損輕減評價價格은 2.6 圓/Kwh 으로 함.

이 結果, 送電液輕減에 對하여서는 特別히 火力發電機의 制御效果가 크기 때문에 上述한 바와 같이 이것을 計算機制御의 一環으로 運用할 것이 크게 要望되고 있다.

또 이 送電損이 輕減效果와 關連하여, LRC. 調相設備 등의 操作回數輕減에 關한 經濟評價를 各 調整設備의 接點壽命과 維持費에 對하여 計算한 結果, 이로부터 얻어지는 操作回數節減額은 送電損輕減에 의한 利得의 數 %

에 不過하다는 것이 確認되었다²⁾.

表 4. LRC. SC. ShR의 接點壽命과 維持費

	LRC	SC. ShR	
		OCB	ABB
接點壽命	20,000回	8,000 ~10,000回	8,000 ~10,000回
維持費	約 2.4圓/回	26~33圓/回	14~17圓/回

4. 運轉電壓의 許容變動幅(ΣV_r)에 對하여

許容變動幅의 크기에 對하여 檢討한 結果의 一例를 그림 9 및 그림 10에 보인다.

前者는 系統內의 調相設備(LRC 包含)만으로 制御한 경우이며, 後者는 같은 外亂케이스 1, 2에 對하여 發電機의 制御까지 包含시켰을 때의 許容變動幅과 送電損의 關係를 보이고 있다. 이들 結果에서 알 수 있는 바와 같이 一般으로는 許容變動幅을 크게 함으로써 어느 정도 損失輕減을 크게 期待할 수 있으나, 그 反面 電壓의 運轉目標值로부터의 偏差도 크게 되어 調相設備의 動作回數增大라는 結果를 가져오게 되었다.

또한 電壓變動의 許容變動範圍로서는, 從來 主로 ±1.0 %라는 比較的 좁은 경우를 生覺하여 왔기 때문에 無効電力潮流에 依한 送電損에 對하여서는 電壓要素를 無視

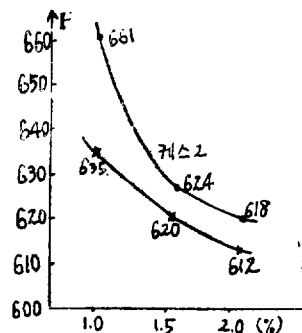


그림 9. 許容變動幅에 따른 送電損의 크기 (發電機: 制御無)

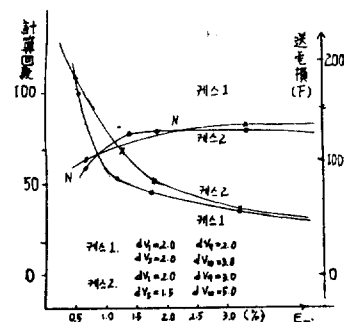


그림 10. 許容變動幅에 따른 送電損의 크기 (發電機의 無効電力制御)

하고 $\sum_{k=1}^l r_k Q_k^2$ 로 代表시켜도 別問題가 없었다⁴⁾.

그리고 電壓變動의 許容範圍를 數 % 정도에까지 넓혀서 生覺할 경우에는, 送電損을 다음과 같이 電壓要素를 考慮하여

$$L = \sum_{k=1}^l \frac{(P_k^2 + Q_k^2)}{V_k^2}$$

과 같이 取扱할 必要가 있을 것이다.

其外에 運轉目標電壓의 決定은 어디까지나 系統運轉條件을 考慮하여 最適運轉態決定이라는 觀點에서 充分히 檢討되어야 할 것이다.

5. 計算機의 規模에 對하여

앞서 檢討한 바와 같이⁴⁾ Search 法에 依한 計算機制御를 實施할 때의 計算機規模는 記憶容量이 約 5,000~6,000, 所要計算時間 1分 정도(但 IBM 7090 級의 演算速度)면 充分할 것이 確認되었으므로, 實用上 On-line 制御가 可能하리라는 것이 實證되었다.

4. 結 論

以上 東京電力超高壓系統에 있어서의 電壓, 無効電力 總合制御適用에 관한 檢討結果,

- (1) 計算機制御를 實施함으로써 所要의 運轉條件 곧 超高壓變電所 二次電壓 및 主要幹線의 無効電力潮流를 許容偏差內에 維持함과 同時에 相當한 送電損輕減效果(本計算例에서는 年間 2,000~3,000 萬圓)를 期待할 수 있다는 것.
- (2) 發電機 運轉方式으로서는 이것을 다만 局地的인 定

電壓 運轉에 그치지 말고 다른 無効電力源과 協調하여 더욱더 積極的으로 利用할 必要가 있다는 點

- (3) 對象系統全體를 一括制御하는 경우에도 計算機制御를 의한 計算機規模로서는 所要記憶容量이 5,000~6,000 정도, 所要計算時間도 Search 法의 利用으로 中形計算機로서도 數分이면 充分하다는 것.

以上の 몇가지를 밝혀, 今後의 系統電壓無効電力總合制御의 實現에 對한 有益한 指針을 주었다.

이 以外에도 將來 計算機制御를 具體的으로 實施하기 爲하여서는 더욱더 研究할 問題가 많으나, 特히

- (1) 系統運用總合自動화와 電子計算機의 多目的 利用法과의 關聯
 - (2) 適切한 運轉基準電壓과 許容偏差의 決定
 - (3) 調整設備의 適正操作量의 決定
 - (4) 情報傳送方式과 그 有效利用法
- 等은 至急 解決시켜야 할 問題일줄 짐작하고 있다.

마지막으로 本研究에 對하여 指導해 주신 塙野一郎教授와 東京電力 給電課 諸氏에게 깊이 感謝하는 바이다.

參 考 文 獻

1. 日本電氣學會 給電專門委 報告書 1966. 9
2. 宋: // 資料 No. 60 1965. 9
3. 宋: 大韓電氣學會誌 Vol. 14, No. 3 1965. 8
4. 宋: // Vol. 14, No. 4 1965. 10
5. 塙野: // Vol. 14, No. 3 1965. 8
6. 東京電力 給電課 技術資料 1965. 7
7. 尾出: 電力中央研究所 技研報告 No. 65014 1965. 5

(1967年 2月 2日 接受)