

韓國電力의 自動給電 시스템에 의한 經濟給電 自動發電制御

尹甲來 黃明遠

1. 概要
2. 自動發電制御의 構成
3. 經濟給電
4. 自動發電制御
5. 電力系統設備와의 結合
6. 結論

1. 概要

보다 大形化되고 複雜해진 電力系統에서 그 본래의 의무를 다하기 위한 機能으로 自動發電制御機能은 遠方監視制御機能과 더불어 중요한 문제로 되어 있었다.

우리나라에서도 電力系統運用 自動化的 일환으로 1979年 6月부터 自動給電시스템(또는 自動發電制御 및 遠方監視制御와 資料取得시스템: LN5400 AGC/SCADA System)을 가동함으로써 막대한 燃料費로 생산되는 電力을 經濟給電(ELD, ED 또는 EDC)에 의한 自動發電制御(AGC 또는 LFC)로 運用함으로써 電力系統 自動制御의 새로운 章을 열었다.

본 解説에서 현재 韓電(株)에서 運用중에 있는 自動給電시스템 機能중에서 우선 經濟給電과 自動發電制御 技術을 중심으로 紹介코자 한다.

2. 自動發電制御의 構成

自動發電制御는 그림 1과 같이 컴퓨터 시스템과 傳送回路 및 自動發電制御裝置등으로 構成되어 있다. 즉 컴퓨터 시스템에서 自動發電制御용 프로그램(PREAGC와 AGC)과 經濟給電용 프로그램(EDR과 EDM)에 의해 最適化技法으로 算定된 各發電機의 有効出力 配分 制御信號가 해당 發電機에 傳送된다. 이信號는 發電

制御機(UCS)를 통하여 發電機의 調速用電動機(GM) 또는 負荷制限用電動機(LLM)를 動作하게 한다. 이動作은 運轉豫備力 확보등 系統條件을 고려하고 해당 發電機의 運轉上·下限值, 出力増減發率등의 條件을 고려한 最適制御信號로 動作된다.

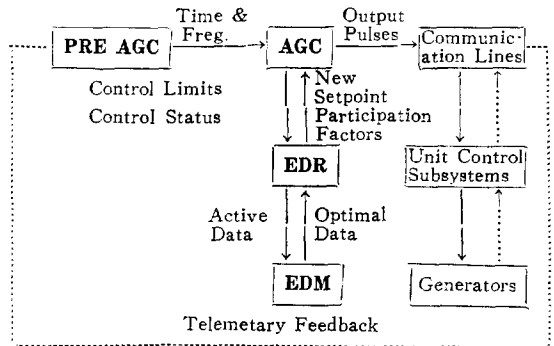


그림 1. 自動發電制御의 構成圖

3. 經濟給電(ED)

가. 理論

經濟給電은 주어진 전력설비를 여러가지 制約條件, 예를 들면 需給均衡의 유지와 運轉豫備力(Hot Reserve 또는 Spinning Reserve) 확보등을 고려하면서 送電 損失이 最少가 되도록 發電出力을 配分한다.

系統燃料費 函數를 F_T 로 하면

$$F_T = \sum_{i=1}^6 F_i(P_i) \quad (1)$$

需給條件

$$\sum_{i=1}^6 P_i - P_L - P_R = 0 \quad (2)$$

運輸豫備力 條件

$$\sum_{i=1}^6 R_i(P_i) - S_R \geq 0 \quad (3)$$

*正會員: 韓國電力(株) 系統運用部

**正會員: 韓國電力(株) 系統運用部

여기서

F_T : 系統燃料費의 合計(원/hr)

G : 制御發電機의 數

P_i : 發電機의 送電端出力(MW)

$F_i(P_i)$: 發電機의 燃料費函數(원/hr)

P_L : 系統送電損失(MW)

P_R : 系統送電端 負荷合計(MW)

R_i : 發電機 i 의 運轉豫備力(MW)

S_R : 運轉豫備力の 合計(MW)

Lagrange 函數 ϕ 를 도입하여 식 (1)을 最少化하면

$$\phi = \sum_{i=1}^G F_i(P_i) - \lambda \left(\sum_{i=1}^G P_i - P_L - P_R \right) - \mu \left(\sum_{i=1}^G R_i(P_i) - S_R \right) \quad (4)$$

만약 函數 $F_i(P_i)$ 가 制約式 (2)(3)을 만족하는 범위 내에서 적당한 볼록조건(Convexity Requirements)을 만족한다면 函數 ϕ 는 最少가 된다. 이 식에서 $G+2$ 개의 未知數(發電機 最遠出力 P_i 와 두개의 Lagrange 수 λ 와 μ 를) 구하게 된다.

식 (4)에서 燃料費 函數는

$$F_i(P_i) = W_i * Q_i(P_i) \quad (5)$$

$$Q_i(P_i) = A_i + B_i P_i + C_i P_i^2 + D_i P_i^3 \quad (6)$$

$$P_{GR} = AX_i + BX_i P_i \quad (7)$$

여기서

W_i : 發電機 i 의 燃料費(원/Kcal)

Q_i : 發電機 i 의 燃料入力(Kcal/hr)

A_i, B_i, C_i, D_i : 入出力 曲線式 係數

AX_i, BX_i : 送電端出力을 發電端出力으로(Net-to-Gross) 變換하는 曲線式 係數

식 (6)에서 $Q_i(P_i)$ 는 볼록조건을 만족하는 係數를 가져야 되고 이러한 目的으로 最少自乘法 프로그램이 개발되어 있다. 이 프로그램은

$$\text{最少化 } E^2 = \sum_{n=1}^M (Q(P_n) - Q_n)^2 \quad (8)$$

$$\text{制約 } \frac{d^2 Q}{dP^2} \geq e, e > 0 \quad (9)$$

식 (6)의 係數를 구해준다. 다음 送電損失은

$$P_L = \sum_{n=1}^M \sum_{n=1}^M B_{mn} P_n P_n + \sum_{n=1}^M B_{on} P_n + B_{oo} \quad (10)$$

으로 표시되며 送電損失係數 算定 프로그램에 의해 Off-Line으로 計算되어 入力된다.

식 (6)에서 $\frac{\partial \phi}{\partial P_i} = 0$ 으로 하면

$$\frac{dF_i}{dP_i} - \lambda \left(1 - \frac{\partial P_L}{\partial P_i} \right) - \mu \left(\frac{dR_i}{dP_i} \right) = 0 \quad (11)$$

$$\text{되어 } \frac{dF_i}{dP_i} = W_i (B_i + 2C_i P_i + 3D_i P_i^2) \quad (12)$$

$$\frac{\partial P_L}{\partial P_i} = 2 \sum_{n=1}^M B_{in} P_n + B_{ii} \quad (13)$$

$$\frac{dR_i}{dP_i} = \begin{cases} 0, & P_{Gi} \leq M_i \\ -BX_i, & P_{Gi} > M_i \end{cases} \text{ for } i \in G \quad (14)$$

여기서

M_i : 豫備力 餘裕(MW)

P_{Gi} : 發電機 i 의 發電端出力(MW)

나. 最適配分

經濟給電에 의한 最適配分은 다음 3가지 단계를 反復함으로서 이루어진다.

첫째, 基本配分 단계에서

$$\frac{dF_i}{dP_i} = \lambda \left(1 - \frac{\partial P_L}{\partial P_i} + \mu \left(\frac{dR_i}{dP_i} \right) \right) \quad (11)'$$

$$\frac{dF_i}{dP_i} = W_i (B_i + 2C_i P_i + 3D_i P_i^2) \quad (12)$$

$$P_{GR} = AX_i + BX_i P_i \quad (7)$$

위의 세식에서 $\frac{\partial P_L}{\partial P_i}$, μ , $\frac{dR_i}{dP_i}$ 를 常數로 두고 P_i, P_{Gi} , λ 를 구하게 된다.

둘째, 豫備力 配分단계로 식 (11)' (12) (7)과 함께

$$\frac{dR_i}{dP_i} = \begin{cases} 0 & P_{Gi} \leq M_i \text{ for } i \in G \\ -BX_i & P_{Gi} > M_i \end{cases} \quad (14)$$

에서 λ 와 $\frac{\partial P_L}{\partial P_i}$ 를 常數로 두고 P_i, P_{Gi}, μ 를 구하게 된다.

셋째, 送電損失 配分단계로

$$\frac{\partial P_L}{\partial P_i} = 2 \sum_{n=1}^M B_{in} P_n + B_{ii} \quad (13)$$

에서 $\frac{\partial P_L}{\partial P_i}$ 가 구해지게 된다.

다. 리얼타임 運轉

經濟給電實行 프로그램인 EDR은 AGC에 의해 다음의 條件이 일어나면 實行된다.

- 1) 制御發電機 數의 변경
- 2) 制御限界值(GNHRG, GNLRG)의 변경
- 3) 運轉豫備力の 변경
- 4) 發電機 制御모우드의 변경
- 5) 系統發電力이 5(%)이상 변동시
- 6) 指令員의 요청시
- 7) 이상의 변동이 없이 5(分)이 지날시

이때 EDR은 다음사항을 計算하게 된다.

- 1) 要求 發電力(Desired Generation)
- 2) 參與率(Participation Factors)
- 3) 經濟限界值(Economic Limits)
- 4) 目標發電力(Target Generation)
- 5) 系統增分燃料費(System Incremental Fuel Cost)
- 6) 系統增分豫備費(System Incremental Reserve

	SOL4	SOL5	GIN1	GIN2
ACTUAL GEN MW	112	245	118	120
ACTUAL GEN MWAV	56	88	52	58
DESIRED GEN MW	112	245	111	120
SET POINT MW	112	245	87	148
PARTICIPATION FACTOR	0.2058	0.0800	0.0820	0.1007
UNIT CNTL MODE	REG	BLR	MAN	REG
UNIT CNTL STATUS	MASTR	MASTR	LOCAL	MASTR
RAMP RATE MW/MIN	0.0	0.0	0.0	0.0
MAX CAPABILITY MW	100	350	162	162
HIGH REG LIMIT MW	131	247	166	178
HIGH REG LIMIT MW	129	246	162	166
LOW REG LIMIT MW	44	108	81	71
LOW REG LIMIT MW	42	58	80	78
HI LIMIT STATUS	OFF	OFF	OFF	OFF
LO LIMIT STATUS	OFF	OFF	OFF	OFF
FUEL COST	7.755	12.016	12.016	12.016
COST MULTIPLIER	1.02	0.58	1.02	1.02
OPTIMUM MW	92	248	82	82
OPT HIGH LIMIT MW	138	358	162	162
OPT LOW LIMIT MW	62	128	88	88

그림 2. Station Generation Display

Cost)

- 7) 系統損失(System Losses)
- 8) 系統燃料費(System Fuel Cost)
- 9) 系統豫備力(System Reserve)
- 10) 系統許用豫備力(System Reserve Affordable)
- 11) 系統燃料費增加分(System Fuel Cost Increase)

매체로 위의 計算을 하는 때는 다음의 세가지 計算모우드에 따라 보다 효율적으로 運轉된다.

- 1) 完全經濟給電: 1)~11)을 모두 計算
- 2) 正常經濟給電: 2), 10), 11)을 제외한 나머지를 計算
- 3) 單純經濟給電: 1)~3)을 計算

4. 自動發電制御(AGC)

가. 理論

自動發電制御는 매 4秒마다 周波數과 각 發電機의 出力을 측정하여 系統周波數를 효과적으로 維持시켜 준다.

$$ASC = F(ACE, II, Td) \rightarrow \text{最少化} \quad (15)$$

$$ACE = P_{Ni} - P_i + B(f - f_r) \rightarrow 0 \quad (16)$$

$$Td = \frac{1}{60} \int (f - f_r) dt = \frac{1}{60} \int f \cdot dt \rightarrow 0 \quad (17)$$

$$II = \int P_{Ni} dt - \int P_i \cdot dt = \int \Delta P_{Ni} \cdot dt \rightarrow 0 \quad (18)$$

식 (15)~(18)에 의하여

$$IACE = \int ACE dt \approx II + 60B \cdot Td \rightarrow 0 \quad (19)$$

여기서

ASC: 地域補充制御(Area Supplementary Control)

ACE: 地域制御偏差(Area Control Error)

Td: 時間偏差(Time Deviation)

II: 連系偏差(Inadvertent Interchange)

B: 周波數마이어스(Frequency Bias)

IACE: 積分偏差(Integrated Area Control Error)

AGC는 크거나 持續的인 外亂(Sustained Disturbances)에 대해서는 신속한 制御動作을 하는 반면 短周期 動搖成分(Fringe Component)과 微小變動에 대해서는 일일이 動作하지 않고 積分偏差로 고려하여 動作하므로써 發電機出力변동을 가급적 빈번하게 하지 않으면서 周波數를 規定值에 維持시켜 준다. AGC의 효과는 發電機마다의 調速機 運轉強化와 적정한 運轉豫備力 확보에 따라 다르겠지만 현재 周波數변화는 60±0.2(Hz) 범위로, 時間偏差는 ±20(秒)범위로 維持시킬 것을 목표로 하고 있다.

나. 參與率(Participation Factor)

AGC는 制御量을 經濟給電에 의해 算定된 參與率로 配分하게 된다.

즉 식 (11)에서

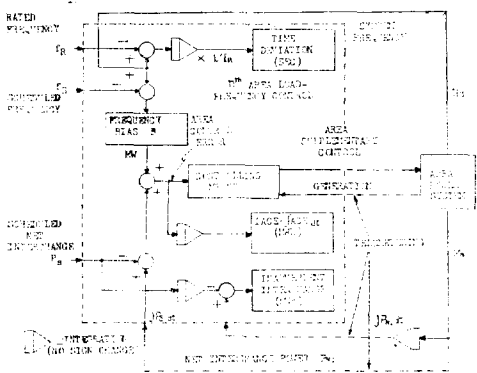


그림 3. AGC의 制御흐름圖

$$\lambda = \frac{\frac{dF_i}{dP_i}}{1 - \frac{\partial P_L}{\partial P_i}} \quad (20)$$

負荷變動이 적을시 $\frac{\partial P_L}{\partial P_i}$ 는 不變으로 가정할 수 있으므로

$$\Delta\lambda = \frac{d}{dP_i} \left(\frac{dF_i}{dP_i} \right) \Delta P_i \quad (21)$$

식 (21)에서 RH_i 를 $\frac{1 - \frac{\partial P_L}{\partial P_i}}{\frac{d^2 F_i}{dP_i^2}}$ 로 두고 풀면

$$\Delta P_i = RH_i \Delta\lambda \quad (22)$$

發電機 i의 參與率을 σ_i 라고 하면

$$\sigma_i = \frac{\Delta P_i}{\sum_i \Delta P_i} \text{ 또는 } \frac{RH_i}{\sum_i RH_i} \quad (23)$$

식 (6)의 2차 微分

$$\frac{d^2 F_i}{dP_i^2} = 2W_i(C_i + 3D_i P_i) \quad (24)$$

식 (21)-(24)에서

$$\sigma_i = \frac{1 - (2\sum_j B_{ij} P_j + B_{oi})}{2W_i(C_i + 3D_i P_i)} \quad (25)$$

이 參與率이 28(秒)~5(分) 주기로 算定되어 AGC 프로그램에 보내줌으로서 經濟給電을 고려한 周波數 制御信號가 해당 發電機에 送信된다.

다. 制御모우드와 限界值

AGC는 다음 3가지 制御모우드를 가질 수 있다.

- 1) Tie Line Bias Control (TLBC 또는 TBC)
- 2) Constant Frequency Control (CFC 또는 FFC)
- 3) Constant Net Interchange Control (CNIC 또는 FTC)

현재 우리나라는 CFC 모우드를 가지며 制御形態에 따라 正常制御(Normal Control State)와 非常制御(Emergency Assist State)가 있어 큰 周波數 變동시는 非常制御에 의해 각 發電機의 單時間出力增減發率로 制御를 하게 된다. 각 發電機에는 다음의 5가지 制御모우드를 가질 수 있다.

2) Off-Line(OFF): Off-Line 發電機

2) Manual (MAN): 現場 手動操作 發電機

3) Regulation(REG): 正常 自動制御 發電機

4) Ramp(RMP): REG 모우드에서 指令員 操作 發電機

5) Base Load (BLR): REG 모우드에서 非常時 自動制御發電機

이상의 制御모우드는 표 1과 같은 制御限界值의 制約을 받게된다.

表 1. AGC 制御 限界值

—Rated Out Put (GNRMX)
—GNHI
—GNTHI
—GNHRG
—GNHEL
—GNHDL
—GNACT(Actual Generation)
—GNLDL
—GNLEL
—GNLRG
—GNTLO
—GNLO
—O

라. Tuning

보다 효과적이고 원만한 制御를 하기 위하여 Tuning을 할 수 있는 機能을 가지고 있다. Tuning은 Power System Simulator 프로그램에 의해 入出力 및 應答을 外亂(Noise, Step, Ramp, Cyclic) 별로 分析함으로써 Tuning 變數를 결정하게 된다.

5. 電力系統 設備와의 結合

AGC에 의해 計算된 制御信號는 각 發電機의 發電 制御機(Unit Control Subsystem)에 의해 發電機의 調速用電動機(GM) 또는 負荷制限用電動機(LLM)를 動作시켜 준다. 發電制御機는 다음과 같은 特徵을 가지고 있다.

- 1) 增減發率 設定에 따른 增減發率의 制約
- 2) 과대한 增減發信號의 入力 및 出力을 排除
- 3) 現場 發電設備의 許用出力上·下限界值設定(GNH-

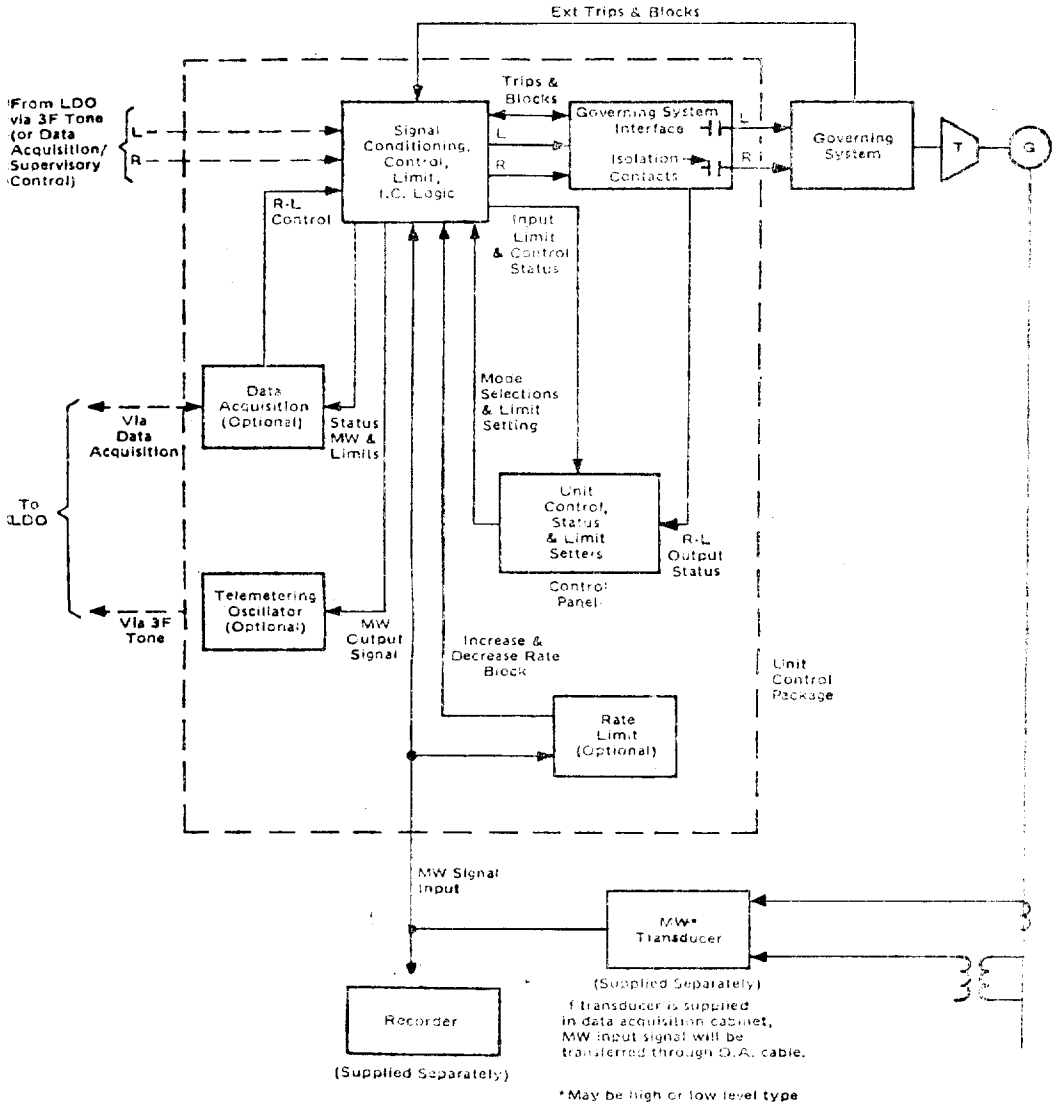


그림 4. 發電制御機(UCS)의 블록圖

RG, GNLRG)

4) 서로 다른 特性을 가진 調速機에도 結合가능한 柔軟性

한편 韓電(株)의 發電所 設備은 여러나라의 여러회사 제품으로서 仕様(Specifications)이 대단히 多樣하다. 調速機系統(Governor System)의 경우도

- 1) 直流直捲界磁電動機(D.C Series Field Motor)
- 2) 直流分捲 또는 永久磁石界磁電動機(D.C Shunt or Permanent Magnet Field Motor)
- 3) 交流誘導型電動機(A.C Induction Motor)

4) 電子油壓式 制御方式(Electro-Hydraulic Control System)

5) 其他 特殊한 方式

등 여러가지가 있다. 이러한 문제에 대하여 일부 回路의 변경 또는 補助繼電機나 特殊回路의 삽입 등으로 원활히 結合되도록 하였다. 韓電(株)에서는 이러한 문제들을 自體技術로 해결하므로써 내부 技術蓄積과 外貨節約 效果를 가져왔다. 그림 3은 發電制御機의 블록圖를 보여준다.

6. 結論

韓電(株)의 自動給電시스템에 의한 經濟給電(ED)과 自動發電制御(AGC)는 앞에서 紹介한 바와같이 컴퓨터 시스템과 情報傳送回路 및 發電機制御裝置를 통하여 發電機出力을 時時刻刻으로 變動하는 電力需要에 均衡을 이루도록하여 周波數를 一定하게 維持시키면서 送電損失을 考慮한 發電燃料費가 最少가 되도록 하는 것이다. 따라서 컴퓨터 시스템과 傳送路 및 發電所의 相關 自動制御裝置의 信賴性 확보가 대단히 중요하다. 아울러 遠隔測定(Telemetering) 되는 資料를 포함하여 컴퓨터 시스템에 入力되는 각종 資料가 正確한 수록 소기의 效果를 충실히 얻을 수 있겠다.

한편 ED와 AGC는 해당 시간에 電力系統에 並列運轉되고 있는 發電機運轉條件만 고려한 瞬時運用機能이기 때문에 별도로 短期負荷豫測과 다음날 時間帶별 發電計劃 및 發電機 並列運轉臺數 結定을 위한 프로그램 등을 開發하여 電力需要變動에 대비하여 하루전 또는 몇시간 전에 미리 조치할 사항들을 해당 發電所 運轉員에게 給電指令으로 알려 줌으로써 發電機의 起動 停止 또는 버너(Burner) 교체등의 필요한 操作을 適時에 하도록 하여 適正한 豫備力 確保등으로 ED와 AGC 機能이 원활히 발휘될 수 있는 運轉條件을 조성해 주어야 한다.

나아가서는 장차 일어날지도 모르는 여러형태의 偶發的 系統事故를 假定 分析하여 보고 적절한 대책을 모색하는 想定事故算定(Contingency Evaluation) 프로그램 등을 개발 적용함으로써 電力系統 信賴度(Security)

를 고려한 給電運用이 되도록 할 것이며, 최근 두드러지게 대두되고 있는 燃料사정과 公害문제를 포함한 環境問題까지도 고려할 수 있는 프로그램들의 開發이 요구된다.

韓電(株)에서는 이러한 實情에서 自動給電設備(AGC/SCADA)와 入力資料의 信賴度向上대책 및 電力系統 擴大와 自動化 業務擴充에 수반한 設備增設 및 프로그램 開發등을 계속 自體技術로 수행하고 있다. 부디 斯界의 支援과 協助 있기를 바란다.

參 考 文 獻

1. AGC & ED; "Documents for Korea Electric Co. Leeds & Northrup Co.," 1979.
2. C.W.; "Ross Error Adaptive Control Computer for Interconnected System" IEEE PAS-85, 1965.
3. F.P. de Mello의 ; "Automatic Generation Control" IEEE Tutorial Course, 1977.
4. 梁興錫의 ; "最適電力潮流計算 프로그램開發에 관한 研究" 서울大 生産技術研究所, 1979.
5. 林柱一, 尹甲求, 金再奇; "Digital Computer에 의한 經濟負荷配分の 研究" 韓國電力, 1972. 2.
6. 黃濯, 尹甲求; "電力系統의 컴퓨터化 運用動向" 대한전기학회 전력계통연구회 발표회 초록, 1979.
7. 尹甲求, 黃甲珠; "컴퓨터 시스템에 의한 自動發電制御" 대한전기학회 전력계통연구회 발표회 초록, 1979.
8. 尹甲求; "自動給電시스템에 대하여" 대한전기학회 지. 1979.