

電力系統의 安定度 解析

李起哲 / 設備研究室

I. 概 要

電力系統의 負荷變化나 故障 등의 擾亂에 대해, 각 發電機 電壓이 일정한 相差角을 갖고, 同期運轉을 유지할 수 있는 정도를 安定度라 하며, 安定度는 擾亂의 크기, 發電機, 送電線, 負荷의 接續方法, 즉 系統構成, 發電機의 임피던스나 慣性 등의 機器定數, 發電機와 負荷의 電力, 無効電力, 發電機 電壓調整器(AVR), 調速機(Governor) 등의 自動制御系, 기타 요인에 따라 좌우되며, 여기서는 電力系統의 安定度 解析方法에 있어서 사용목적과 방법의 내용 등에 대해서 서술하고자 한다.

II. 安定度の 分類

1. 擾亂의 크기에 의한 分類

가. 定態安定度

電力系統에서 負荷變化가 완만할 경우 안정하게 송전가능한 정도이며, 즉 小擾亂에 대한 安定度로, 擾亂의 變化가 發電機의 固有振動周期나 AVR, 調速機 등의 応答時間에 비해 상당히 완만한 경우이다.

나. 過渡安定度

電力系統이 어느 조건하에서 안정하게 송전하고 있을때, 地絡, 短絡, 斷線, 回線遮斷, 再閉路, 系統分離 등의 擾亂이 있어도 다시 安定狀態를 회복하여 송전가능한 정도로서 大擾亂에 대한 安定度로, 擾亂의 變化가 급격한 경우이다.

2. 制御系の 取扱方法에 의한 分類

가. 固有安定度

AVR, 調速機 등의 制御系의 효과를 무시하고, 發電機 内部電壓이 일정하다고 보는 安定度이다.

나. 動的安定度

AVR, 調速機 등의 制御系를 고려한 경우의 安定度이다. 따라서 가, 나 의 관계를 조합하여 표를 만들어 보면 <表 1>과 같다.

		擾亂의 크기	
		小	大
制御系	無視	固有 定態安定度	固有 過渡安定度
	考慮	動的 定態安定度 (動態安定度)	動的 過渡安定度

<表 1> 安定度の 分類

實系統現象은 모두 制御系의 效果가 포함된動的安定度이나, 이 效果를 무시한 固有安定度는 해석이 간단하여 安定度의 기본적인 特性을 이해하기에 쉽다.

한편 動態安定度는 解析의 対象時間에 따라 過渡安定度, 中間領域安定度, 定態安定度로 구분할 수 있다.

〈表 2〉는 각 安定度 解析方法이 어떤 目的으로 사용되고 있는가를 표시한 것이다.

	目的	過渡	中間領域	定數	검토할 事項
系統計劃	基幹送電系統의 構成	○		○	장래의 外輪系統 및 그 이하의 電壓階級の 系統構成
	次期上位電壓의 選定	○		○	장래의 主幹系統의 最高電壓階級
	大電源地點에서의 送電方法	○	△	△	장래 建設予定되는 大容量發電所에서 外輪系統까지의 送電方法
系統運用	基幹送電系統의 運用目標	○	△	○	近年度의 外輪系統 및 下位電壓系統의 電力送電分布
	会社間 連系方式과 運用方法	○	△		電力会社間의 連系方式과 그 運用基準, 保護方式
	變則系統의 運用方法	○	△	△	送電線補修 및 一部 變更改設時의 運用方法, 保護方式
	各種 安定度 向上對策	△	○	△	中間開閉所, 制動抵抗 등의 安定化對策과 保護方式
	事故波 및 防止對策		○	△	主保護以後의 各種 予備保護方式 및 系統分離方式
	系統異常現象 事故의 解明		○	△	系統에서 生기는 異常 電力動搖現象 및 重大事故의 記錄과의 對比
發電所運用	發電所의 運轉限界	△		○	有効·無効電力의 運轉許容範圍
	系統事故時의 發電所에 끼치는 影響	△	○		電力變動 및 그後の 動搖와 plant trip 條件과의 關係
	發電所의 制御系 最適值의 選定	△	○		勵磁系의 最適值 및 補助信號回路

〈備考〉○表는 주로 검토되어지는 項目, △表는 一部 검토되어지는 項目

〈表 2〉 安定度 解析目的과 검토할 解析方法

III. 電力系統의 動特性 modeling

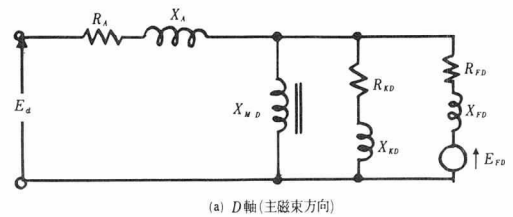
電力系統의 安定度를 해석하기 위해서는 各系統構成要素를 어떻게 표현하는가가 중요하고, 이 modeling은 직접 安定度解析精度에 영향을

준다. 安定度 解析精度 향상을 위한 系統의 model化는 世界 各國에서 研究 進行中이다. 系統特性의 modeling은 發電機와 制御系統, 負荷의 三種類로 구분된다.

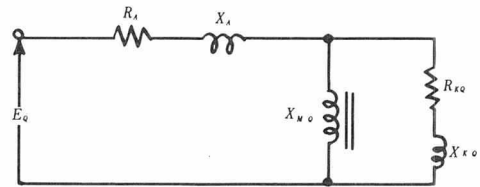
1. 發電機

電力系統에 연결되어 있는 發電機는 거의 同期機로 극히 일부분의 小容量 水力에 誘導機가 이용되나, 여기서는 同期機의 model化에 대해서 서술한다.

同期機는 〈그림 1〉과 같이 電機子卷線, 界磁卷線 및 制動卷線回路로 나누어진다.



(a) D軸(主磁束方向)



(b) Q軸(主磁束에 直交하는 方向)

여기서, R_d, X_d : 電機子 卷線의 임피던스
 X_{wd}, X_{wq} : 空腔의 리액턴스
 $R_{xd}, X_{xd}, R_{xq}, X_{xq}$: 制動卷線의 임피던스
 R_{fd}, X_{fd} : 界磁卷線의 임피던스

〈그림 1〉 同期機의 等価回路

〈그림 1〉의 發電機 等価回路를 系統에 연결했을 때의 解析順序는 다음과 같다.

가. 發電機의 電機子回路의 電壓과 磁束, 電流에 관한 微分方程式은 다음과 같다.

$$\vec{E}_t = \vec{Z}_g \cdot \vec{I}_g + \vec{E}_g \dots \dots \dots \textcircled{1}$$

여기서 \vec{E}_t, \vec{E}_g : 發電機의 端子電壓과 内部電壓

\vec{Z}_g, \vec{I}_g : 發電機 等価임피던스와 電機子電流

나. E_g 는 다음식과 같은 回轉子의 界磁·制動

巻線の 微分方程式에 따라 구해지는 각 磁束으로부터 정해진다.

$$\left. \begin{aligned} \frac{d}{dt} \phi_f &= E_f + f(\phi_f, \phi_k, I_g, \delta_g) \\ \frac{d}{dt} \phi_k &= f(\phi_f, \phi_k, I_g, \delta_g) \\ \vec{E}_g &= f(\phi_f, \phi_k, \delta_g) \times W_g \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots ②$$

여기서 E_f, I_g : 界磁電壓과 電機子電流
 ϕ_f, ϕ_k : 界磁巻線과 制動巻線の 鎖交磁束
 δ_g, W_g : 發電機 内部 相差角과 回轉速度

다. δ_g, W_g 는 다음식과 같은 發電機 運動方程式에 따라 구해진다.

$$\left. \begin{aligned} \frac{d}{dt} \delta_g &= (T_{in} - T_g) / M_g \\ \frac{d}{dt} \delta_g &= S_g \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots ③$$

여기서 S_g : slip이 있을때의 회전속도 $W_g = 1.0 + S_g'$ 로 된다.

M_g : 發電機 + 터빈의 加速度 定数

T_{in} : 터빈에서 發電機로 的 入力 토크

T_g : 發電機 出力토크 = $f(\phi_f, \phi_k, I_g, \delta)$

라. 發電機의 磁束, 内部電壓에 관한 式은 실제로는 D軸, Q軸 각각 해석되어야 하므로, 複素座標, R-X와의 사이에 다음과 같은 變換式을 이용한다.

$$\begin{pmatrix} R \\ X \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sin \delta_g & \cos \delta_g \\ -\cos \delta_g & \sin \delta_g \end{pmatrix} \begin{pmatrix} D \\ Q \end{pmatrix}$$

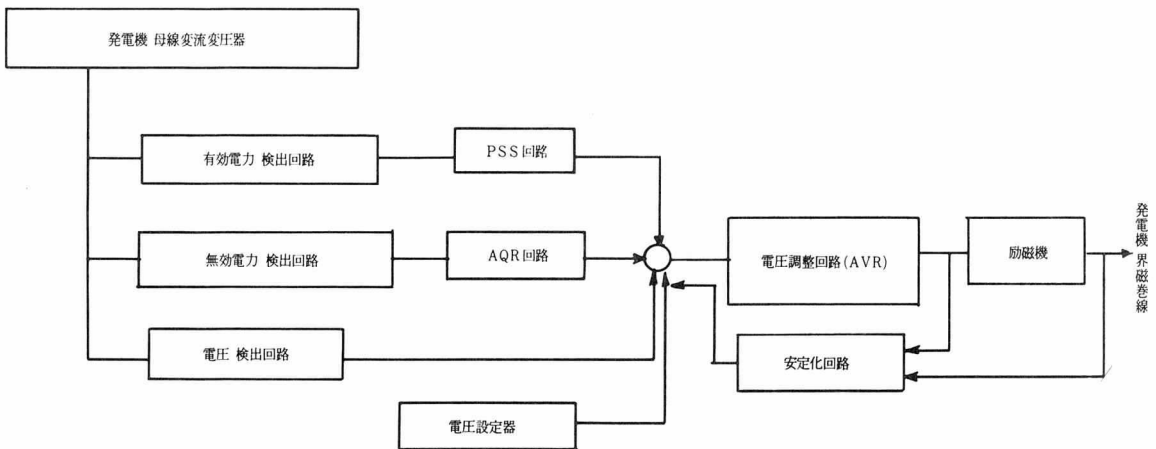
2. 發電機 制御系 Model

發電機의 制御系는 發電機의 界磁電壓을 제어하는 勵磁界와 터빈에서 發電機에 들어가는 入力토크를 제어하는 調速系로 구분된다. 이 制御系는 發電機의 機器保護와 系統의 安定度 향상대책에 중요하다.

發電機의 機器保護란 勵磁系에서는 發電機 端子電壓上昇의 抑制, 無効電力의 過不足 運轉時의 熱容量 한계내에서의 制御이고, 調速系에서는 發電機 trip時의 過速度 防止 등을 의미한다. 경우에 따라서는 系統安定度を 저하하도록 동작하기도 하여, 系統運用의 立場에서 충분한 검토가 있어야 한다. <그림 2>와 <그림 3>은 勵磁系와 週速系의 구성이다.

가. 勵磁系

勵磁系는 <그림 2>와 같이, 發電機의 端子電壓을 入力으로 하는 回路(AVR系)와 無効電力을 入力으로 하는 回路(AQR系)가 基本構成이고, 系統의 安定度 향상책으로 發電機 有效電力이나 回轉數, 周波數 등을 入力으로 하는 回路(PSS系)가 더해지기도 한다. 安定度 解析에 대해서 응답이 빠른 AVR系나 PSS系는 대단히 중요하나, 응답이 느린 AQR系는 무시해도 된다.



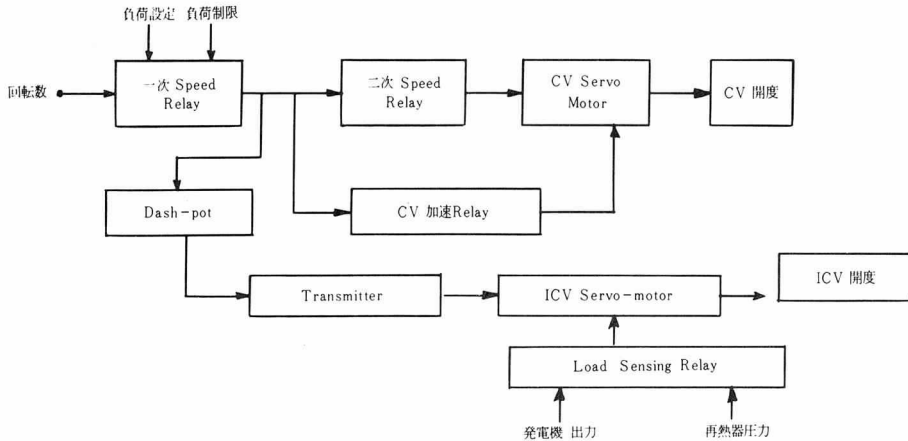
<그림 2> 勵磁系의 構成

다. 勵磁機는 応答性이 빠르고, 制御利得이 높고, 安定度 면에서 同期化力과 制動力이 동시에 높은 SCR形 AVR과 補助信號를 入力으로 하는 PSS와의 組合된 制御方式이 有効하다.

나. 調速系

調速機는 系統安定度에 미치는 영향이 勵磁系에 비해 작으나, 최근의 大容量火力, 原子力 터빈 發電機는 系統分離時의 速度上昇에 대해 안전의

문제가 야기되어, 制御油压의 高压化, 電子式 制御回路의 도입 등 加速度 governor system 이 有効하다. <그림 3>은 火力, 原子力用的 調速系의 例로, 制御基本構成은 보일러 加熱器에서 高压터빈에의 蒸氣를 제어하는 加減弁(CV)과 再熱器에서 中低壓터빈에의 蒸氣를 제어하는 中間止弁(ICV)으로 구분된다.



<그림 3> 調速系의 構成 (Single Governor 경우)

3. 電力系統의 負荷

電力系統의 負荷 modeling 에 대해서 현재 널리 이용되는 것으로 다음과 같은 방법이 있다.

가. 函數表現

送電系統의 각 變電所의 母線에서 配電系統을 보아, 母線의 電壓과 周波數가 變化한 경우, 有效電力과 無效電力이 어떻게 變化하는가를 다음과 같은 式으로 표현한다.

$$\text{有效電力} : P_L = K_P V^n (1 + L_P \Delta f)$$

$$\text{無效電力} : Q_L = K_Q V^m (1 + L_Q \Delta f)$$

여기서 V : 端子電壓, K : 電壓負荷係數

L : 周波數 負荷係數,

Δf : 周波數의 變動分

윗式은 多項式으로 표현하는 有效電力을 例로 하면 다음과 같은 경우도 있다.

$$P_L = (K_0 + K_1 V + K_2 V^2 + \dots) (1 + L_P \Delta f)$$

윗式의 第1項을 定電力, 第2項을 定電流, 第3項을 定임피던스負荷라 부르며, 無效電力負荷

의 成分에 대해서는 電壓의 3 乘의 項까지 표시하는 것이 있다. 이와같은 函數表現方法은 系統의 電壓이나 周波數의 變化가 작은 領域의 靜的인 model 이라 부르고, 이것을 연장하여 大電壓이나 周波數 變動의 어느 現象에 대해서는 負荷脫落을 가미하여 표시하는 경우가 있다.

나. 誘導機表現

系統負荷의 거의 半정도가 工場 등 大需用家에서 使用, 誘導機를 이용한 電氣機械가 사용되어, 負荷의 일부분을 誘導機로 표현하여, 函數表現에서 표시 가능한 電壓, 周波數變動에 대한 負荷의 動特性을 고려한 安定度解析을 하는 것으로, <그림 4>와 같은 等価回路를 電壓系統에 결합하여, 電流와 誘導토크를 계산하는 방법이 일반적이다.

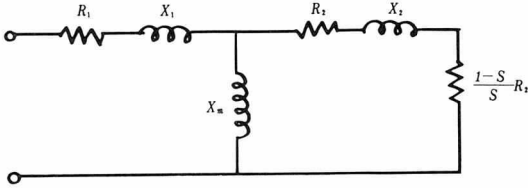
또 輕負荷特性은 다음式과 같이 표시한다.

$$T_L = K_0 + K_1 S + K_2 S^2$$

$$\frac{d}{dt}S = (T_L - T_E) / M$$

여기서 S : slip, K : 輕負荷比例係數
 T_L, T_E : 各 輕負荷와 誘導토포크
 M : 慣性定數

負荷의 model化는 各種機器의 다른 特性을 送電系統에서 보아 간단하게 집약하려는 문제이다.



〈그림 4〉 誘導機의 等価回路

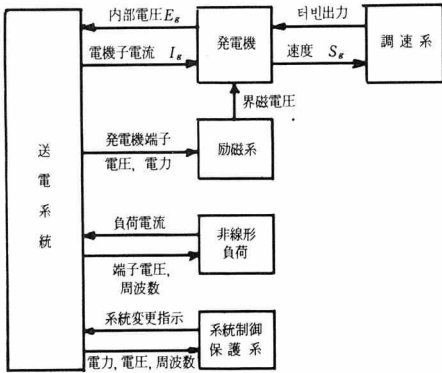
IV. 安定度 解析方法

Model化에 의해 얻어진 電力系統의 動特性은 다음式과 같이 高次 非線形 常微分方程式과 代數式으로 표시된다.

$$\sum_{i=1}^n \frac{d}{dt} x_i = f(x_i, y_i)$$

$$\sum_{i=1}^n y_i = f(x_i)$$

여기서 x_i : 同期機, 誘導機, 勵磁系, 調速系, 등의 狀態量
 y_i : 送電系統의 電圧이나 發電機·負荷에서 系統에 주입되는 電流



〈그림 5〉 安定度 解析의 概念圖

〈그림 5〉는 이 發電機나 負荷와 送電系統이 결합한 상황을 표시한 것으로 送電系統은 다음과 같은 代數式으로 표시된다.

$$\begin{pmatrix} \vec{I}_{Gt} \\ \vec{I}_{Lt} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y_{GG} & y_{GL} \\ y_{GL} & y_{LL} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \vec{E}_G \\ \vec{E}_L \end{pmatrix}$$

윗식의 代數式은 음法則에 의한 複素數 vector式으로, 發電機와 定阻抗를 제외한 非線形負荷의 連立代數式이고, Y_{ij} 는 機械間의 어드미턴스 matrix이다.

發電機에서는 磁束에 의해 정하는 内部電圧이 \vec{E}_G 이고, 非線形負荷의 경우, 端子電圧과 電流 I_L 의 算定結果에서 有效分과 無效分の 電力이 미리 표시한 函數值가 되도록 反復計算하여 E_L 을 정할 필요가 있다. 이와같은 動特性의 式을 해석하는 方法으로 動態安定度의 경우 非線形方程式을 그대로 해석하는 것으로 數值積分法을 이용한 直接法과, 定態安定度에서는 非線形部分을 運轉點에서 線形化하여, 그 特性式의 固有值를 求하여 安定性을 판정하는 間接法이 있다.

1. 直接法

微分方程式의 直接解法中 널리 이용하는 것으로 다음 方法이 있다.

가. Runge-Kutta法

時間 t 인 微分方程式의 Taylor 展開에서 時間 $t + \Delta t$ 의 값을 구하는 方法

나. Trapezoidal法

時間 t 에서 $t + \Delta t$ 의 狀態方程式의 값을 추정하여 微分方程式을 解析, $t + \Delta t$ 의 값에서 狀態方程式의 값을 수정하고 다시 微分方程式을 解析, 이 값이 소정의 變化幅 이하가 되도록 반복 計算하는 것이다. 실제로 대규모 系統의 安定度 計算을 直接法으로 해석하는 데에는 상당한 演算時間이 필요하다.

2. 間接法

發電機의 動搖方程式은 相差角 δ 일때 다음식과 같다.

$$MP^2 \delta_t + (D_s - G_v(p)) P \delta_t = T_m - T_e$$

여기서, M : 慣性定數,

$D_s, G_v(P)$: 軸系 Damping 과 調速系 傳達函數

T_m : 터빈 入力토포크,

T_e : 電氣的 出力토포크

P : 微分演算子 ($= \frac{d}{dt}$)

T_m 은 일정하나, T_e 는 勵磁系의 制御特性, 發電機의 δ , 非線形 負荷特性 등에 의한 多次非線形의 傳達函數로 표시되어 각 發電機의 相差

角의 微小變動 $\Delta\delta_i$ 에 관한 演算子 行列式을 얻을 수 있다.

$$A(P)[\delta_i] = 0$$

$$A(P) = \begin{bmatrix} M_1 P^2 + D_1(P)P + S_{11}(P) + \dots + S_{nr}(P) \\ M_n P^2 + D_n(P)P + S_{1n}(P) + \dots + S_{nn}(P) \end{bmatrix}$$

여기서 $M_i P^2$ 은 加速成分,

$D_i(P)P$ 는 Damping 成分,

$S_{ij}(P)$ 는 同期化成分

이 線形微分方程式은 $\Delta\delta_i$ 의 값에 관계없이 성립하기 위해서는 $|A(P)| = 0$ 이 되어야 한다.

즉, 實數의 根 P_i 는 이 系의 固有值이고, 全体 固有值의 實部가 負이면 系統은 安定하고, 根 한개라도 正이면 發散根이 되어 불안정하다. 固有值의 虛部는 動搖周期를 표시한다. 이 行列式의 解法으로 Routh-Hurwitz 定理, 發電機 制御系를 고려한 周波數 應答法 등이 있다. 定態安定度의 解析은 直接法과 間接法의 어느 쪽도 이용 가능하다. 直接法의 특징으로는 非線形 要素를 고려하여 小外亂에서 大外亂까지의 各중의 安定度를 구할 수 있으나, 系統을 상세히 표현하는데 演算時間이 길어지는 점이 있고, 間接法은 미소한 擾亂에 대해 動搖周期成分을 정확히 취할 수 있다.

V. 解析精度를 향상키 위한 系統試驗

電力系統의 安定度 計算結果는 系統安定化를 위한 各種 制御裝置의 도입, 送電線의 신증설, 安定도면에서 本 系統運用基準의 책정, 次期上位 電壓의 결정 등을 할때 중요한 檢討資料가 되므로, 解析精度를 검토하여 精度向上을 도모할 필요가 있다. 다음과 같은 여러 系統試驗을 실시하여, 異常現象의 資料를 수집함이 좋다.

1. 模擬 送電線 試驗

模擬送電線은 數十~數百kW의 發電機 set를 여러台 설치하여, 케이블이나 架空送電線을 數 km 單位로 분할한 R-L-C回路의 集合體로 模擬하여 電熱, 모터負荷 등을 부가한 試驗裝置로서 새로 개발된 各種 安定化裝置의 實驗이나, 實系統에서 模擬할 수 없는 故障를 실제로 발생시켜, 동일조건에서 해석한 결과와 비교하여, 그 유효성을 판정하는데 적용되어, 解析方法의 개발에 중요한 장치이다.

2. 人工故障 試驗

實際의 電力系統을 이용하여, 電力需用家에 대해 供給支障이 없는 범위에서 各種 故障를 발생시켜, 동일조건에서의 解析結果와 비교하는 것이다. 實系統에서 地絡이나 短絡 등의 故障를 인공적으로 하는 것은 需要家에 대한 영향이 커서 어려운 점이 있어, 送電線의 閉閉試驗이나 發電所를 系統에서 분리한 短絡試驗 등으로 실시될 수 있다.

前子는 주로 新設 發電機의 勵磁系 등의 制御特性試驗이나 主要幹線 開放時의 電力動搖把握을 위한 試驗으로써, 後者는 老朽화된 水力機에 대해서 定數算定이나 短絡時 機械強度의 算定方法의 檢討를 위해 실시되는 수가 많다. 이러한 試驗은 試驗前의 檢討나 調査가 상당히 精度 높게 이루어지므로, 精度向上에 귀중한 資料를 얻을 수 있다.

3. 調速機 負荷遮斷 試驗

速度上昇에 대해 調速系가 정상 동작하고, 發電 plant가 정상으로 정지하는가를 판정하는 調速機 負荷遮斷試驗은 電力系統側에서 보면 發電機의 경우는 電力不足, 揚水機의 경우 電力過剩이 되어, 大容量機의 負荷遮斷試驗에서는 그 變動量이 系統 全体의 數% 되는 경우도 있고, 과도적으로는 幹線潮流나 母線의 周波數의 動搖를 얻는다. 이것을 이용하여 系統 全体를 模擬하여 解析 結果와 비교하는 것은, 電力系統의 電力의 過不足에 대한 特性, 특히 過渡時의 動搖에 대한 解析精度의 檢討를 하는데 특히 중요하다.

4. 系統異常 · 故障計測裝置

電力系統의 異常狀態나 故障發生 後의 電力動搖現象을 계속하여 기록하는 裝置를 설치하여, 調速機 負荷遮斷試驗이나 人工故障 試驗에서는 얻지 못하는 各種 外亂에 대한 系統의 應動을 이는데 귀중한 資料가 되어, 사전이나 사후에 실시하는 解析結果와의 비교로 精度의 향상에 기여할 수 있다.

VI. 結 論