

345KV送電線の 過渡安定度計算 (2)

技術解説
18~2~1

A study on transient stability of 345KV power transmission line

李 在 淑*
(Chae Sook Lee)

5. 系統構成

서울—釜山間에 345KV 2回線の線路가 建設되던, 本區間에는 既設 154KV線路가 並行하게 된다. 그러나 安定度計算에서는 安全側을 擇하여 並行하는 既設線路의 影響은 無視하였다. 送受電端에는 300MVA, 345KV/154KV, Auto-Transformer 3臺式이 設置되며, 發電機는 送電端에 連結되고 그 容量은 900MVA(3×300MVA) turbo-generators 이다.

中間地點에 線路開閉를 할 수 있는 開閉所의 設置與否는 過渡安定度計算結果에서 絶對로 有利하다는 結論이나와 中間開閉所를 두기로 하였다. 그러나 實地에 있어서는, 本開閉所는 將次變電所로 轉換되어 湖南地方의 電力需給에 利用될 것이 豫測된다.

서울—釜山間의 345KV 送電線을 包含한 關聯電力系統圖는 附圖 II와 같으며 送受電端에는 將次 345KV의 外輸線이 構成될 것이 豫測된다.

過渡安定度計算에 있어서는, 受電端인 서울地區를 無限大母線으로 看做하고, 此母線에 連結된 水力, 汽力, 火力發電所群中에서 釜山地區에서 送電되는 電力과 關係되는 345KV 2回線만을 拔萃하여 取扱하였으니, 345KV 系統은 單獨系統이라고도 볼 수 있는 것이다.

6. 定態安定度에서 본 送電容量

6.1 送電系統의 安定度

送電系統이 不變負荷 또는 極히 천천히 變化하는 負荷가 걸려있을時, 繼續하여 送電할 수 있는 能力을 定態安定度라 하고, 此에 對하여 送電系統이 어떤 條件下에서 安定하게 運轉되고 있을 時 急作히 急激한 擾亂이 發生하여도 다시 平衡狀態를 回復하여 送電할 수 있는 能力을 過渡安定度라고 말한다. 그리고 前者는 後者의 特種한 境遇 即 擾亂의 程度가 極히 작은 境遇라고 볼 수 있다.

安定度を 維持할 수 있는 範圍內的 極限送電電力을 各 各 定態安定極限電力, 過渡安定極限電力이라 한다.

6.2 定態安定極限電力의 計算

送電線의 電力回線圖에 依하여 345KV 送電線의 定態

安定極限電力을 算出하는 同時에 一定한 電力을 送電할 時 그 力率을 달리 함에 따라 受電端에 어느 程度의 靜電容量을 設置해야 하는지 檢討해 보기로 한다. 그리고 系統圖는 그림 6.1圖와 같다.

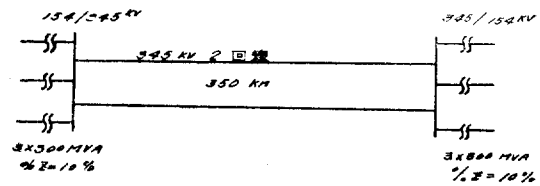


그림 6.1

(1) 線路定數

$$Z = 350 \times (0.04 + j0.376) = 14 + j132.2 \Omega$$

$$Y = 350 \times (0 + j4.30 \times 10^{-6}) = 0 + j1508.0 \times 10^{-6} \text{ S}$$

(2) 送受電變壓器 reactance (10%로 假定)

$$Z_t = \frac{(\%Z) \times 10 \times E^2}{\text{KVA}}$$

여기서

%Z : Percentage reactance 10%

E : 線間電壓, 345KV(送受電端共히)

KVA : 變壓器容量 300,000 KVA

$$\therefore Z_t = \frac{10 \times 10 \times 345^2}{300,000} = 39.7 \Omega$$

(3) 回路定數

$$A_0 = \left(1 + \frac{ZY}{2} + \frac{Z^2 Y^2}{24} + \dots \right) = 0.9020 + j0.01018$$

$$B_0 = Z \left(1 + \frac{ZY}{6} + \frac{Z^2 Y^2}{24} + \dots \right) = 13.1 + j130.1$$

$$C_0 = Y \left(1 + \frac{ZY}{6} + \frac{Z^2 Y^2}{120} + \dots \right) = (-5.185 + j1.460) \times 10^{-6}$$

$$D_0 = A_0$$

2回線임을 勘案하면

$$A_1 = 0.9020 + j0.01018$$

$$B_1 = 6.55 + j65.05$$

$$C_1 = (-10.37 + j2.920) \times 10^{-6}$$

$$D_1 = A_1$$

* 正會員 : 韓電送變電技術役

LOCATION MAP OF THE PLANTS (AT THE END OF 1967) KOREA ELECTRIC COMPANY

SEOUL - INCHON AREA

EXISTING

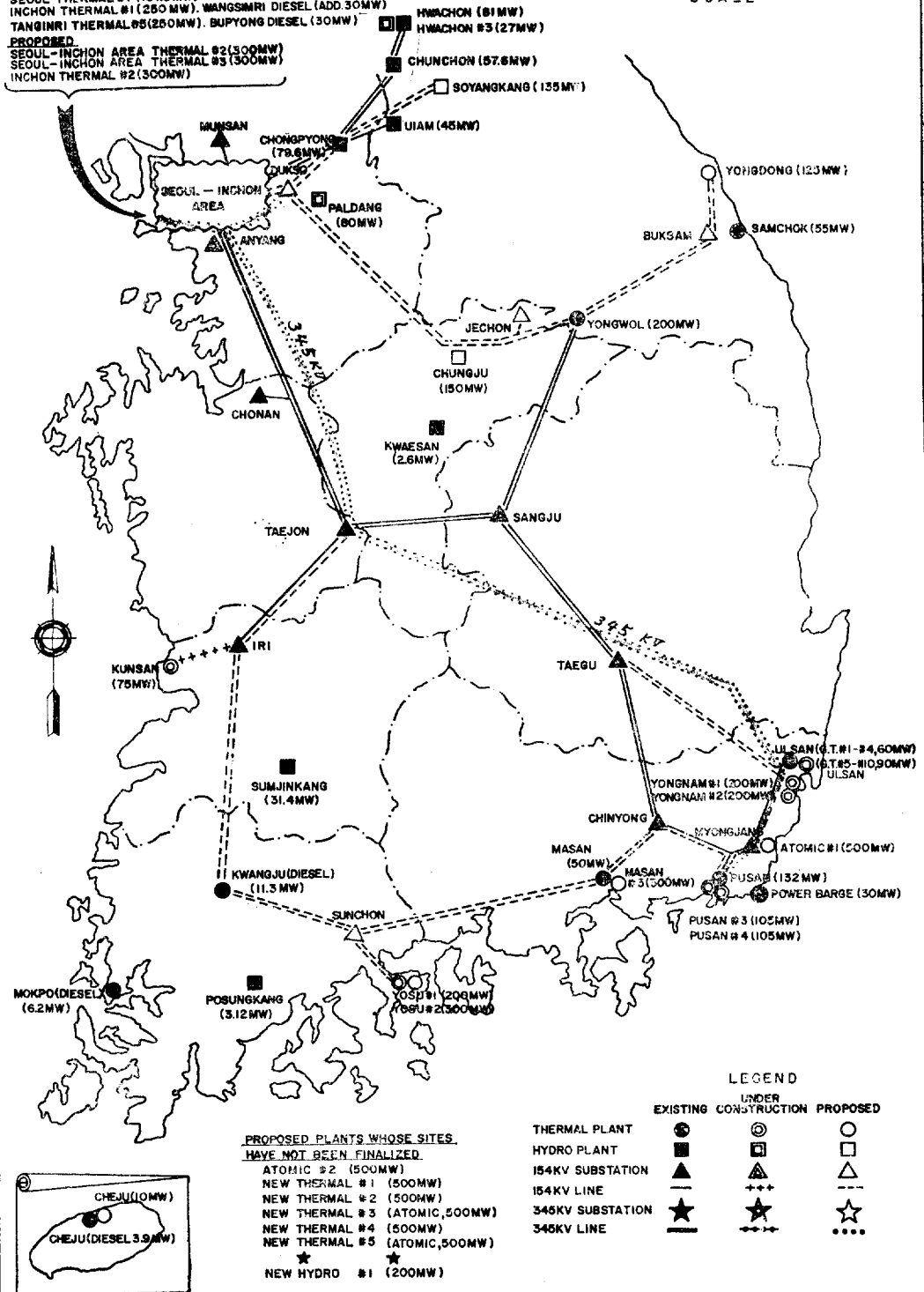
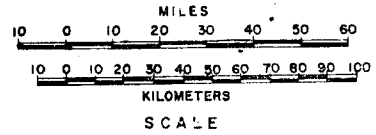
TANGINRI THERMAL (47.5MW)
WANGSIMRI DIESEL (16.75 MW)

UNDER CONSTRUCTION

SEOUL THERMAL #1 (137.5 MW)
INCHON THERMAL #1 (250 MW), WANGSIMRI DIESEL (ADD. 30MW)
TANGINRI THERMAL #5 (250 MW), BUPYONG DIESEL (30 MW)

PROPOSED

SEOUL-INCHON AREA THERMAL #2 (300 MW)
SEOUL-INCHON AREA THERMAL #3 (300 MW)
INCHON THERMAL #2 (300 MW)



附圖 II

다음 送受電端의 變壓器 Reactance (3 臺並列)를 勘案 하면

$$A_2 = A_1 + C_1 Z_{TS}$$

$$= 0.902 + j0.01018 + (-10.37 + j2.920) \times j13.2 \times 10^{-6}$$

$$= 0.8635 + j0.01005$$

$$B_2 = B_1 + A_1 Z_{TR} + D_1 Z_{TS} + C_1 Z_{TS} Z_{TR}$$

$$= 6.55 + j65.05 + (0.9020 + j0.01018)j13.2 \times 2 + (-10.37 + j2.920) \times 10^{-6} \times j13.2 \times j13.2$$

$$= 6.284 + j88.3$$

$$C_2 = C_1 = (-10.37 + j2.920) \times 10^{-6}$$

$$D_2 = A_2 = 0.8635 + j0.01005$$

$$A_2 D_2 - B_2 C_2 = 1.0026 - j0.0001 = 1$$

(4) 圖線圖

送電線의 送受電端의 電壓 및 電流를 E_S, E_R 및 I_S, I_R 라고 하고, 그 回路定數를 A_2, B_2, C_2 및 D_2 라고 하면, 다음 關係式이 成立된다.

$$\begin{cases} E_S = A_2 E_R + B_2 I_R \\ I_S = C_2 E_R + D_2 I_R \end{cases} \dots\dots\dots (6.1)$$

$$\begin{cases} E_R = D_2 E_S - B_2 I_S \\ I_R = C_2 E_S - A_2 I_S \end{cases} \dots\dots\dots (6.2)$$

上記, (6.1), (6.2)式에서 電力圖線圖作成用諸數値를 誘導한 結果는 아래와 같다.

送電端電力圖線圖關係值(\dot{W}_S)는

$$\dot{W}_S = (m' - jn') E_S^2 - \rho e^{-j(\theta + \beta)} \dots\dots\dots (6.3)$$

受電端電力圖線圖關係值(\dot{W}_R)는

$$\dot{W}_R = \rho e^{\alpha(\theta - \beta)} - (m - jn) E_R^2 \dots\dots\dots (6.4)$$

여기서

送電端電力中心座標는

$$m' - jn' = D_2 / B_2 = (0.85 - j9.68) \times 10^{-3}$$

受電端電力中心座標는

$$m - jn = \dot{A}_2 / \dot{B}_2 = (0.85 - j9.68) \times 10^{-3}$$

電力圖半徑(ρ)은

$$\rho = \bar{E}_S \bar{E}_R / b, \text{ 그리고 } \frac{1}{b} e^{-j\beta} = \frac{1}{\dot{B}_2}$$

$$= 11.3 \times 10^{-3} e^{-j85^\circ 56'}$$

(5) 計 算

送受電端電壓을 345KV 로 固定하여 電力圖作成에 必要한 數値를 求하면

送電端電力圖中心座標,

$$(m' - jn') E_S^2 = (0.85 - j9.68) \times 10^{-3} \times 345,000^2$$

$$= 95,750 - j1,152,000 \text{ KVA}$$

受電端電力圖中心座標,

$$(m - jn) \bar{E}_R^2 = (0.85 - j9.68) \times 10^{-3} \times 345,000^2$$

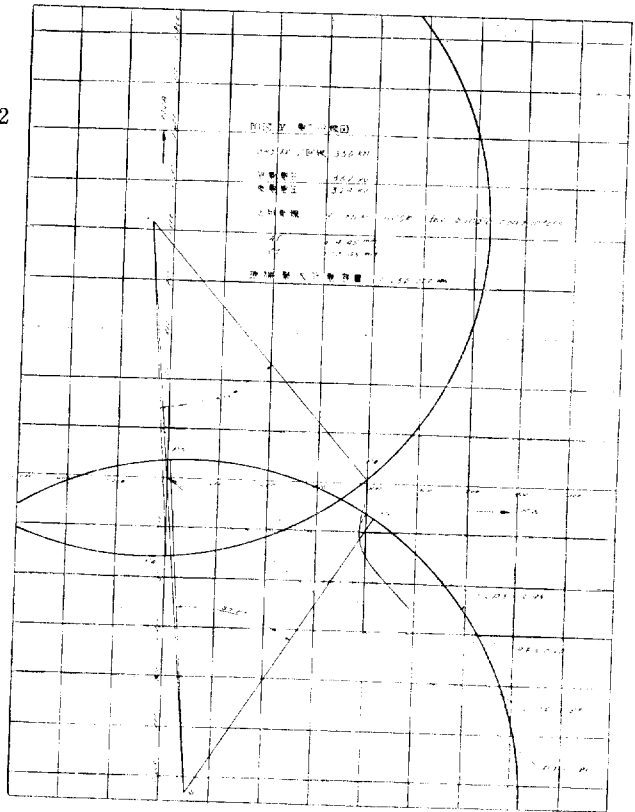
$$= 95,750 - j1,152,000 \text{ KVA}$$

電力圖半徑

$$\rho = \frac{1}{b} \bar{E}_S \bar{E}_R = 11.3 \times 10^{-3} \times 345,000^2$$

$$= 1,348,000 \text{ KVA}$$

以上の 計算結果를 利用하여 電力圖線圖를 作成하면 附圖 III 과 같으며, 最大送電容量 卽 定態安定極限電力은 1,250,000KW 에 達한다.



附圖 III 電力圖線圖

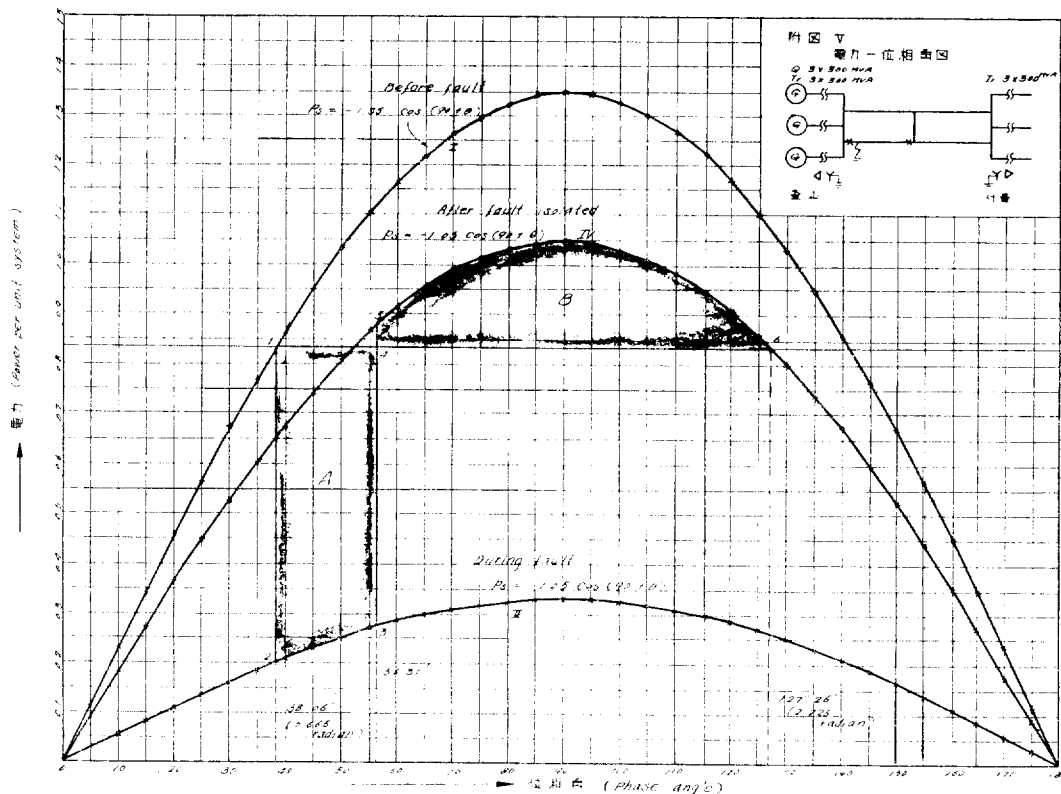
다음 送電端電壓을 362KV 로, 受電端電壓을 328KV 로, 卽 送受電端電壓에 10%의 電壓降下를 許容하면, 送受電端의 電力圖線圖는 附圖 IV 와 같다. 그리고 定態安定極限電力은 亦是 1,250,000KW 이다. 그러나, 이러한 定態安定度에서 定한 最大送電容量은 過渡安定度面에서 보면 相當히 낮아진다.

(6) 進相容量;—

送受電端電壓을 다같은 값인 345KV 로 維持하는 定電壓送電時와, 送電端電壓은 362KV, 受電端電壓은 328KV 로 維持할 時에 있어 力率 1.0, 800MW 의 電力을 送電

力率	800MW 送電時受電端 Condenser 容量 單位 MVA	
	送受電端電壓 같은 345/345KV	送受電端電壓降下10% 362/328KV
1.0	140	20
0.95	400	300
0.90	530	400
0.85	650	490

6.1 表 800MW 送電時所要 Condenser 容量



附圖 IV

하러면 어느程度的蓄電器를受電端에設置해야 하는지檢討하던前者는 140MVA가 所要되나, 한편後者는 20MVA가 所要된다. 6.1表는 同一負荷 800MW 送電時에 있어 그力率의變化에 따라 Condenser 容量이 어떻게 增減해야 하는지를 表示한 것이다.

7. 過渡安定度에서 본 送電容量(其一)

7.1 過渡安定度の概念: 一

安定度の問題는 送電系統에 包含되는 同期機에 있어 機械軸에 作用하는 機械的인 힘과, 捲線에 作用하는 電氣的인 힘과의 平衡의 問題이다. 따라서 安定度에 關係되는 要素는 發電機에서는 機械的인 入力와 電氣的인 出力, 電動機에서는 機械的인 出力과 電氣的인 入力에 關係를 가진 全部의 要素를 包含하게 된다.

7.1圖는 過渡安定度에 關聯을 갖이게 되는, 이러한 機器와 定數等을 單線圖로 表示한 것이다. 卽 原動機, 同期發電機, 線路 reactance, 同期電動機, 그리고 機械的인 軸荷重이 表示되었다.

機械的인 主要要素,

- (i) 原動機의 入力 Torque
- (ii) 原動機 및 發電機可動部의 慣性

- (iii) 電動機와 軸荷重의 慣性
- (iv) 軸荷重의 出力 Torque

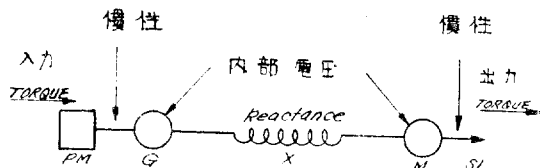


그림 7.1 發電機安定度檢討用基本圖

PM 原動機 G 同期發電機 X 線路 Reactance
M 同期電動機 SL 軸荷重

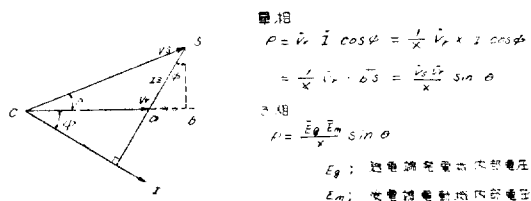


그림 7.2 電氣的인 主要要素

- (i) 同期發電機의 內部電壓 (ii) 系統 reactance
 - a. 發電機 Reactance. b. 線路 Reactance.
 - c. 電動機 Reactance.
- (iii) 同期電動機의 內部電壓

한편 過渡安定度を 檢討하려는 電力系統의 損失을 無視하면 7.2圖에서 알 수 있는 바와 같이 3相交流送電系統의 電力傳達公式은

$$P = \frac{\bar{E}_g \bar{E}_m}{\bar{X}} \sin \theta \quad (7.1)$$

여기서

P : 送電되는 3相電力(Watt)

\bar{E}_g : 發電機內部線間電壓(絶對值)(Volt)

\bar{E}_m : 電動機內部線間電壓(絶對值)(//)

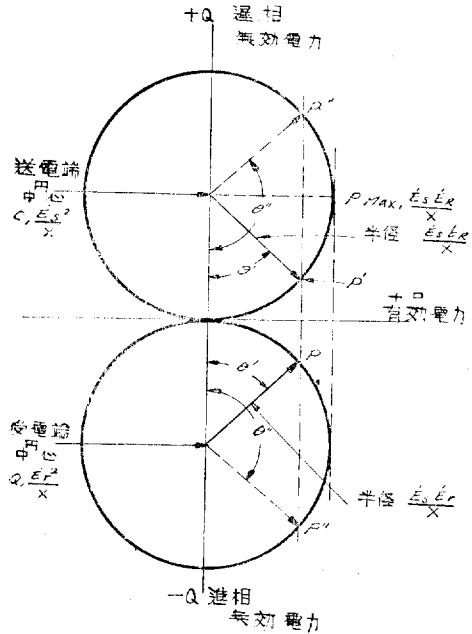
\bar{X} : 發電機와 電動機內部電壓間 Reactance(Ω /相)

θ : 發電機와 電動機內部電壓間位相角

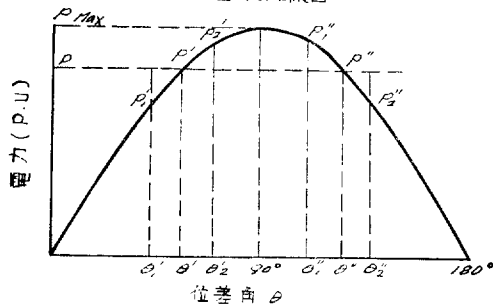
7.1式에 있어 電壓과 Reactance 를 單位法을 使用하여 表示하고, 送電되는 電力도 採擇한 KVA base에 對하여 單位法으로서 表示하는 것이 過渡現象檢討에는 便利하다. 그리고 單位法에 依하여 表示된 量을 實際量으로 換算하는 때는 採擇한 KVA base 量을 그 數值에다 곱하면 된다.

그림 7.3의 電力-位相角圖(Power-Angle Diagram)에서 P 라는 電力이 送電되고 있을 때 이에 該當되는 曲線上의 點은 P' 와 P'' 의 兩點이 있다. p' 일 때에 相應하는 位相角差는 θ' 이고, p'' 일 때에 相應하는 位相角差는 θ'' 이다. 送電損失은 없다고 假定하고 있는 關係로 p' 와 p'' 의 크기가 같다는 것은 當然하다. 萬一外的 影響을 받아 內部電壓間의 作相角이 θ' 에서 θ_1' 로 減少하면 이것은 發電機에서 電動機로 가는 電力이 減少한 것을 意味한다. 그러나 水車 또는 Turbine의 出力 Torque는 Governor가 動作하기까지는 變化하지 않고, 一定值를 維持하게 된다.

따라서 發電機는 電氣的出力보다 機械的入力이 많아 發電機回轉子는 加速된다. 이러한 結果는 送受電端間의 位相角差를 增加하게 된다. 한편 受電端에서 보면 同期電動機에 供給되는 電氣的入力 p_1' 는 系統擾亂이 일어나기 前의 電動機出力보다 작다. 따라서 電動機에서는 發電機와는 反對로 減速現象이 일어나, 이것 亦是 送受電端의 位相角差를 增加하게 된다. 따라서 p' 點에서 位相角이 어떤 原因으로 θ' 에서 θ_1' 로 減少하게 되면 送電電力이 減少되어 送受電端機械의 內部電壓位相角差를 增加시켜 電力系統을 原運轉位置인 位相角 θ' 로 復歸시키려는 힘을 갖어오게 한다. 그러나 回轉體는 慣性이 있으므로 原位置인 θ' 에서 停止치 않고 θ' 角을 넘어가게 되어 θ' 角을 中心으로 하여 位相角은 振動하게 된다. 그리고 實地系統에는 損失이 있으므로 이 振動의 振幅은 漸次減衰하여 原位置인 θ' 角位置에서 安定된다. 即 θ' 角에서 θ_2' 角으로 넘어서게 되면, θ_2' 位置에서는 發電機出力 P_2' 가 原動機의 機械的入力 P 보다 크다. 따라서 發電機는 減速되고, 送受電端位相角差를 減少시키는 傾向을 가진다. 한편, 受電端電動機에서는 機械的出力보다



a. 系統電壓 E_s, E_r , 線路 reactance X 에 對한 基本円線圖



b. 電力-位相角 基本圖

그림 7.3

電氣的入力이 많으므로 電動機는 加速되어 亦是 送受電端間의 位相角差를 減少시키는 傾向을 나타낸다. 即 Power-Angle 曲線前半部에 位置하는 P' 點 即 θ' 角度에서는 僅少한 擾亂電力이 瞬間的으로 發生하여도 그 方向에 關係없이 그 原因만 除去하면 原位置即 θ' 點에 復歸한다.

다음 電力 P'' 가 位相角 θ'' 에서 送電되고 있을 때, θ'' 보가 θ_2'' 로 增加했다고하면 發電機出力과 電動機入力이 다같이 P_2'' 로 減少한다. 따라서 發電機出力은 原動機入力보다 작고, 電動機의 入力은 그 出力보다 亦是 少아진다. 따라서 發電機는 加速되고, 電動機는 減速되어, 送受電端位相角差가 漸次커져간다. 따라서 原位置로 復歸치 않고 脫調現象이 나타나 系統은 不安全狀態에 들어간다.

또 θ' 에서 θ_1'' 位置 即 P_1'' 로 位相角이 變化하면 發電機의 電氣의 出力은 機械的 入力보다 크고 電動機에서는 電氣의 入力보다 機械的 出力이 작다. 即 送受電端位相角差는 發電機를 減速하고 電動機를 加速한다. 따라서 送受電端位相角差는 原點 θ'' 點에 復歸치 않고 漸次 줄어들어가는 傾向이 나타나 θ_1'' 點은 不安定하다는 것을 알 수 있다. 그러나 θ_1'' 點에서 位相角이 漸次 줄어들어 가면 終末에 가서는 θ' 點에 移動하게 되어 系統은 安定한 運轉狀態에 들어갈 수 있다. 따라서 θ'' 點은 系統振動角의 最大限度(The critical point in system oscillation)이며, θ' 點에서 運轉하고 있을時 系統騷亂으로 位相角이 θ' 點을 中心으로 하여 振動할 時 θ'' 點을 超過해서는 안 된다는 것을 말해주는 것이다.

7.2 過渡安定度の 限度

過渡安定도에 影響을 주는 外的 要因은 主로 다음 세 種類가 있다.

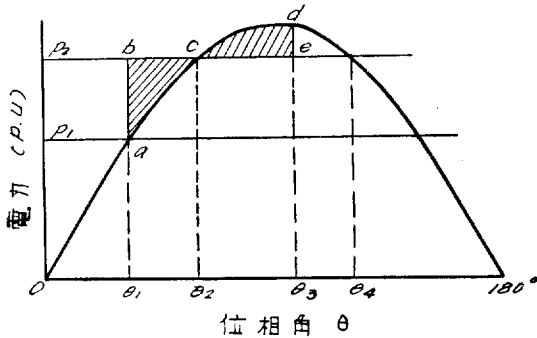


그림 7.4 負荷增加時電力一位相角圖

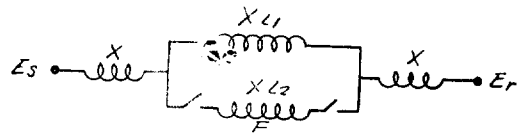
- (1) 負荷의 增加
- (2) 線路의 開閉
- (3) 線路事故의 除去

(1) 負荷의 增加는, 過渡擾亂에 對한 安定도에 큰 影響을 미친다. 即 (A) 負荷가 定態安定度限界를 넘었을時, (B) 急激한 負荷의 增加가 系統騷亂을 일으켜 前述한 바와 같이 位相角이 Critical point를 넘었을 時이다. 그림 7.4에서 位相角 θ_1 에서 電力 P_1 를 送電하고 있을時 急作히 原動機의 入力이 P_2 로 增加할 時를 考慮한다. 回轉機의 慣性으로 因하여 發電機와 電動機의 內部電壓은 電力 P_2 를 送電할 수 있는 θ_2 位相角으로 直時 變位를 못 한다. 그 代身, 이러한 入力과 出力間의 差異는 發電機를 加速하거나, 電動機를 減速하는데 消費된다.

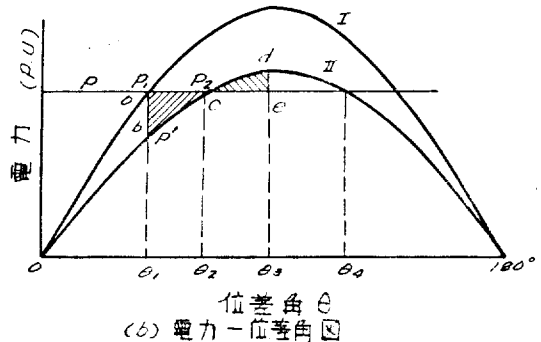
이러한 加速 또는 減速은 回轉部가 同期速度에서 離脫脫하고, 그 位相角差를 增加시킨다. 이에서 系統이 θ_2 에 到達하면, 發電機는 同期速度보다 干若 높게 電動機는 同期速度보다 若干 낮게 回轉한다. 回轉體에 蓄積되어 있는 Energy는 瞬間적으로 消耗될 수 없으므로 位相角은 θ_2 位置를 넘게 되고, θ_3 位置까지 到達한다. 이때에 系統損失을 無視하면 斜線部 cde는 abc의 面積과 같다.

그리고, 振幅은 絶對로 θ_3 를 넘지는 않으며 系統에는 實地에 있어서 損失이 있으므로, 漸次振幅이 줄어들어가 θ_2 位置에서 平衡을 이루게 되는 것이다. 本圖에서 圖示하는 바와같이 系統은 θ_3 角度까지 振動하며 θ_3 는 90도 보다는 크나 電力 P_2 에 對한 Critical Angle θ_4 보다 작으므로 系統은 安定하다. 以上 負荷의 急激한 增加는 系統을 振動시키므로 安定度面에서 보아 θ_4 角度를 넘지 않은 P_2 의 範圍가 過渡安定度の 限界라는 것을 알 수 있다.

(2) 線路의 開閉로 因한 過渡安定度の 限界, 이것은 負荷의 增加로 因한 安定度限界를 決定하는데 適用한 바와 같은 等價面積法을 利用하여 檢討할 수 있다. 그러나, 本場遇에 있어서 電力位相角曲線는 두개이다. (1) 初期狀態에 있어서의 電力一位相角曲線 (2) 最終狀態에 있어서의 即 開閉操作이 끝난 다음의 狀態에 있어서의 電力一位相角曲線이다. 그림 7.5 a는 2個의 線路가 運轉中에 있었음을 表示하고, 同圖 b는 初期狀態에서 適用되는 曲線 I과 最終狀態에서 適用되는 曲線 II를 表示한다. 그리고 本圖에서, 送電되는 電力은 P , 初期狀態에서는 位相角 θ_1 , 電力 P_1 , 終狀態에서는 位相角 θ_2 , 電力 P_2 로서 運轉되고 있었음을 나타내고 있다. 線路가 開放되는 瞬間電氣出力은 P_1 에서 P' 로 減少한다. $(P_1 - P')$ 크기의 電力은 發電機를 加速시키는 同時에 電動機를 減速시킨다. 따라서 送受電端機械의 位相角差를 増力시키는 傾向에 놓이고 位相角은 P' 에서 θ_1 로 位動하려 한다. 이때에 發電機回轉子는 同期速度보다 높게 回轉하고 電動機回轉子는 同期速度보다 낮게 回轉하여 送受電端機



(a) 等價回路



(b) 電力一位相角圖

그림 7.5 線路開閉時의 過渡安定도를 檢討하는 電力一位相角圖

器內部電壓의 位相角은 θ_2 角度를 넘어 θ_3 角度까지 到達된다. 그리고 面積 abc 는 面積 cde 와 같다. θ_3 角度에서 同期速度보다 높은 또는 낮은으로 因한 回轉部의 蓄積 Energy 는 振動過程에서 漸次消耗된다. 그리고, 發電機의 瞬間의 出力과 電動機의 瞬間의 入力은 原動機의 入力보다 兩者共히 크므로 復元力 即 元位置 θ_2 에 되돌아가려는 힘이 생기 θ_2 를 中心으로 하여 振動하면서 漸次 θ_2 位置에서 安定된다.

同期速度에서 脫調하지 않고, 送電할 수 있는 量은 (1) 線路開放後의 系統의 定態安定度에서 본 最大送電電力限度와 (2) 初期 및 最終의 安定運轉位相角間의 角度差에 左右된다. 即 以上을 달리 表現하면, 線路開閉로 因한 安定度限界는 最終系統狀態에서 系統 Reactance 가 커질수록 낮은 값을 갖고, 또 始初가 最終系統狀態에서의 系統 Reactance 差가 커지면 클수록 그 값은 亦는 낮아진다.

(3) 事故와 그 事故回路의 直時除去, 세번째로 論議하려는 이 項目은 過渡安定度에 第一 큰 影響을 주는 것이다. 事故發生과 事故回路의 除去로 因한 擾亂을 檢討하려면, 3 個 또는 4 個의 系統狀態가 考慮對象이 되어야 한다. 即 (i) 事故發生直前의 初期系統, (ii) 事故發生中의 系統 그리고 (iii) 事故回路를 除去한 後의 系統이다. 高速度再閉路의 遮斷器를 使用할 時 事故回路를 瞬間에 遮斷하여, 事故回路의 電弧를 消滅시키고 다음 再閉路하여 系統를 原狀態로 復舊하는 境遇도 考慮해야 한다.

檢討對象의 系統은 그림 7.5 a 와 같으며 遮斷되는 回路의 中間地點에서 事故가 發生하였다고 假定한다. 그림 7.6에서 2 回線이 運轉되고 있을 時 電力一位相角曲線은 Curve I 로서 表示되며, θ_1 角度에서 送電되는 P_1 電力과 交叉한다.

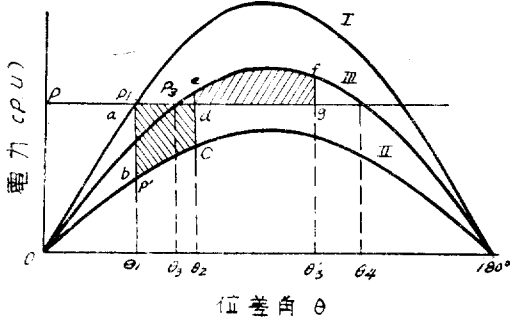


그림 7.6 事故發生後 事故線路를 除去할 時 過渡安定度 檢討用 電力一位相角圖

系統에 事故가 發生하면 事故種類에 따라 回路는 不平衡이 된다. 그러나 安定度問題에 있어서는 主로 正相回路의 電力만 對象으로 함으로 不平衡狀態의 系統에

7.1 表 不平衡狀態에 있는 系統의 正相回路算出用表

故障의 種類	故障時等價 Impedance	Z_x 의 挿入方法
一線接地 事故;	$Z_x = Z_0 + Z_2$	故障點과 假想中性線과의 사이
二線接地 事故;	$Z_x = \frac{Z_0 Z_2}{Z_0 + Z_2}$	" "
線間短絡;	$Z_x = x_2$	" "
三線短絡;	$Z_x = 0$	" "
一線斷線;	$Z_x = \frac{Z_0 Z_2}{Z_0 + Z_2}$	故障點에 直列
二線斷線;	$Z_x = Z_0 + Z_2$	" "

있어서도 正相回路만 考慮하면 足하다. 不平衡狀態에 있어서 正相等價回路는 7.1 表에 依據하여 算出할 수 있다. 故障種類에 따라 故障點과 假想中性點사이 또는 故障點에 直列로 7.1 表數値를 故障發生前正相回路에 連結해야 한다. 이러한 故障中의 正相等價回路에 依據하여 電力位相角關係圖를 作成한 것이 b 및 c 點을 通過하는 Curve II 이다. 그리고 事故區間이 除去된 다음의 電力位相角關係를 表示한 것이 Curve III 이며, θ_3 角度에서 送電되는 電力 P_3 點을 通過하고 있다. 事故의 發生은 發電機의 出力과 電動機의 入力을 P 에서 P' 로 減少한다. ($P-P'$) 電力은 發電機를 加速하고 電動機를 減速하는데 吸收된다. 甚한 事故가 發生할 時, 事故가 急速히 除去되지 않으면 系統은 脫調狀態에 들어간다. 事故除去가 位相角 θ_2 까지 變位하는 時刻에 除去되었다고 假定한다. 이 時刻에 系統은 最終狀態 即 Curve III 로 轉換한다. 이 때에 電力位相角關係를 檢討하면 發電機出力은 入力보다 커서, 發電機는 減速하고, 한便 電動機는 加速된다. 그러나 回轉子에 있어 同期速度보다 높거나, 또는 낮은 速度로 因하여 蓄積된 Energy 로 因하여, 系統位相角은 θ_2 에서 停止치 않고 더 큰 角度인 例컨대 θ_3' 라는 角度까지 變位한다. 이때에, 面積 defg 는 面積 abcd 와 같은 크기이다.

따라서 θ_3' 는 等面積法을 採擇한 本方法에 있어, 系統振動時 到達하는 最大振幅點이며, 將次に 가서는 θ_3 點에서 安定狀態에 들어간다.

萬一, 事故狀態에서 送電할 수 있는 電力의 크기를 本例보다 줄이는 表現으로, 事故의 深刻度を 反映하거나, 또는 事故持續期間이 θ_2 로 表示되는 量보다 增大하거나 또는 最終의 電力一位相角曲線에서 그 크기가 本圖 curve III 보다 작으면, 系統振動時의 最大角度는 θ_3' 를 超過하게 되고, 어떤 條件下에서 Critical Angle 인 θ_4 에 到達할 것이다. 이때에 過渡安定도는 그 限界點에 到達하였다고 할 수 있다.

그리고 高速度再閉路遮斷器를 使用할 時, 系統故障에 隨伴하여 發生하는 過渡安定도가 어떻게 變化하는지 檢

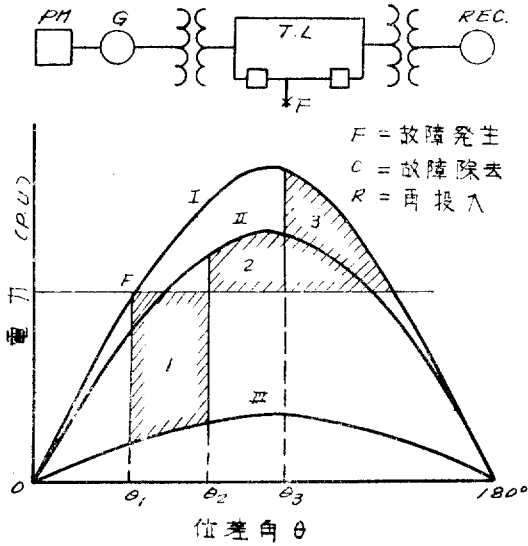


그림 7.7 2회선의境遇
 Curve I : 2회선 正常
 Curve II : 1회선 正常
 Curve III : 故障中(2L—Ground)
 安定限界, 面積 1 ≦ 面積(2+3)

討하면 그림 7.7 와 같다. 即 事故中, 閃絡을 消滅키 爲하여 事故線路는 開放無電壓이 되고, 다음 一定한 時刻後에 原狀復舊를 爲하여 再閉路된다. 安定度를 維持키 爲한 條件은 電力—位相角圖에서 面積 1 이 面積 2 와 面積 3 의 合計보다 작아야 한다.

以上으로서 過渡安定度를 維持키 爲해서는 그림 7.5도 및 그림 7.6도에서는 位相角이 θ_2 가 되기 以前에 故障이 除去되어야 하며, 그림 7.7도에서는 亦是 位相角이 θ_2 以內에서 故障이 除去되고, θ_3 以內에서 故障이 除去된 事故線路가 再投入되어야 한다는 것을 알 수 있다. 그러나 實地에 있어서는 系統變化는 送受電端의 位相角差에 依하여 表示되는 것이 아니고, 事故發生時를 始點으로 하는 時刻의 函數로서 表示된다. 即 保護繼電器와 遮斷器의 動作까지에 所要되는 時間으로 表現된다. 그리고 이 時間의 算出方法은 Step-by-Step process에 依하며, 各段에 即 各時刻마다 加速力의 變化, 速度의 變化여기에 따르는 位相角變化를 算出하게 되며, 一定한 位相角에 到達하기까지 이 方法을 되풀이하는 것이다.

어떤 電力系統에 있어 機器의 內部電壓을 一定하다고 假定하고, 送電線의 Reactance를 亦是一定하다고 假定하고, 系統損失을 無視하면, 定態安定度로 因한 極限送電電力値는 한 個밖에 없다. 그러나 過渡安定度로 因한 極限送電電力値는 條件을 달리 함에 따라 여러가지가 있다. 即 負荷增加에 對한 것은 初期負荷狀態와 負荷增加

의 速度에 따라 變化하고, 線路開閉에 對한 것은 初期位相角과 最終系統條件에 따라 變化하며, 系統에 事故가 發生하고, 다음時刻에 除去하는 境遇의 것은 初期運轉 位相角, 事故의 苛酷度와 持續時間 그리고, 事故가 除去된 다음의 그 系統의 安定限度에 左右되는 것이다. 따라서 過渡安定度를 言及할 時は 恒常 그 系統의 어떤 條件下에서 檢討한 것이라는 것을 明確히 하여야 한다.

7.3 位相角—時間即 Swing Curve:—

發電機 또는 電動機의 廻轉子가 어떤 位相角까지 到達하는 時間을 算出키 爲해서는 位相角 θ 는 時間의 函數로서 Step-by-Step 方法에 依하여 決定된다.

그림 7.8는 受電端無限大母線에 對하여 送電端發電機 廻轉子의 加速度, 速度 그리고 位相角이 變化하는 것을 圖示한 것이다. 本圖는 앞으로 採擇되는 Step-by-Step 方法의 一部分인 三箇의 區間을 表示한 것이며 本圖에서는 系統變化가 第3區間의 終末에서 發生한다고 假定한다. 速度 ω_1, ω_2 및 ω_3 는 各己 3區間에 있어 一定值라고 假定한다. 또 한便에 加速度는 各區間의 中間點에서 다음 中間點까지 一定值에 있다고 假定한다. 이러한 假定으로서 加速度는 實線에 依하여 表示된 實際值보다 交代로 커졌다, 작아졌다 하는 結果가 된다. 따라서 計算結果의 誤差를 極小化할 수 있다.

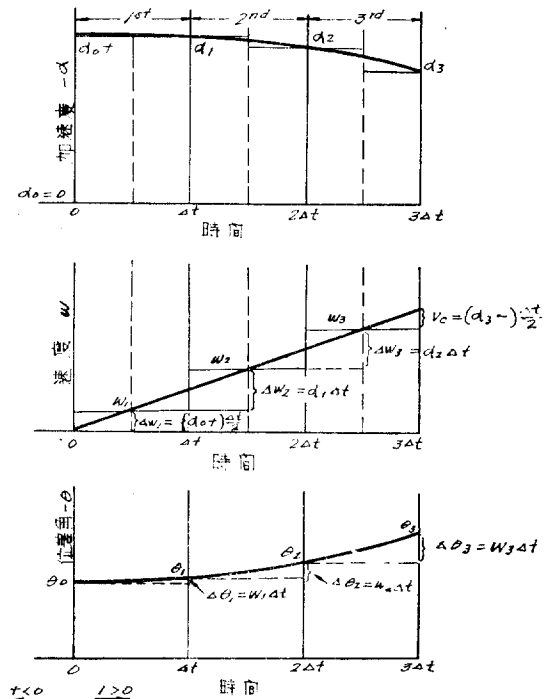


그림 7.8 Step by step 法

初期加速度 α_0 는 $t=0$ 時에 나타나는 過渡擾亂의 始初에 있어 發電機位相角에 따르는 電力에 關聯시켜 計算할 수 있다. 다음 本初期加速度는 速度 ω_1 를 計算하는데 있어, 첫 時間間隙 Δt 의 前半部에 適用된다. 그리고 角變化 $\Delta\theta_1$ 는 그 間隙內의 平均 速度 ω 로부터 計算할 수 있다.

最終角 即 第一次間隙末의 角 θ_1 는 初期角 θ_0 와 角變化 $\Delta\theta_1$ 의 合計가 된다. 그리고 第二次間隙에 對해서는 加速度 α_1 는 第一次間隙計算時 算出한 角 θ_1 를 利用하여 計算한다. 다음 速度의 增加는 時間 Δt 를 通해서 一定한 加速度 α_1 值를 使用하여 얻을 수 있다. 그리고 이 速度를 使用하여 다음 間隙中에 나타나는 角度變化를 計算할 수 있다. 即 角度變化는 速度 ω_2 와 時間增加 Δt 와의 積으로서 計算할 수 있다.

이러한 計算方法은 系統이 變化하지 않거나, 時間間隙이 變化하지 않은 時間中의 各區間에 對하여 되풀이된다. 萬一 兩者中하나가 變化하면 本項序頭에서, 말한바와 같이 加速度와 角變化는 區間末에 對한 것이며, 한便 速度는 區間中間點에 對한 것이므로, 速度校正項이 必要하다는데 그 原因이 있다.

系統變化時 區間初期 또는 앞의區間末에 對한 加速度率을 區別하기 爲하여 + 또는 - 符號를 使用한다. 그리고 이러한 + 또는 - 符號가 省略될 때에는 區間末의 加速度임을 表示한다.

時間間隙은 計算上便利하게 定하면 되나 0.1 秒보다 커서는 안된다. 普通 0.05 秒가 採擇되고 있으며, 이것은 60 ∞ 系統에서는 3 ∞ 에 該當한다.

7.4 慣性定數와 加速度

同期 Turbo-Generator 또는 同期電動機의 加速力은 初期運轉條件과 電力 또는 機械損失을 勘案한 入力과 出力間의 差의 크기에 따라 左右된다. 따라서 어떤 發電機에 對한 加速力 ΔP 는 아래와 같이 表示될 수 있다.

$$\Delta P = P_i - (P_0 + L)$$

여기서 P_i 는 機械的入力, P_0 는 電氣的 出力 그리고 L 는 全體損失이다. 그러나 損失 L 는 過渡安定度計算에서는 無視하여도 別支障이 없다.

同期機의 慣性 Moment 은 그 容量, 速度 또는 追加裝置로 因하여 廣範圍하게 變化한다. 그러나 多幸히도 慣性定數가 그 容量의 單位 KVA 當 蓄積된 energy 로서 表示하면 比較的 좁은 範圍內에서 變化한다. 蓄積된 energy constant 即 單位慣性定數 H 와 慣性 Moment WR^2 의 關係는 다음 式에 依하여 주어진다.

$$H = \frac{KW-sec}{KVA} = 0.231 \frac{(WR^2)(rpm)^2 \times 10^{-6}}{KVA}$$

여기서 WR^2 는 慣性 moment 이며, LBS-(feet)²로 表示된다. 그리고 rpm 은 每分間의 回轉速度이다. 單位慣性定數 H 는 1에서 10 KW-sec/KVA 로서 機器의 形態 및 速度에 따라 差가 있다.

2 機問題를, 取扱하는데 있어 그 한便을 無限大慣性을 가진 것으로 假定하면 남은 한쪽의 機器의 等價慣性定數는 다음 方法에 依하여 決定된다. 即 a 및 b 機의 蓄積된 energy 를 $H_a KVAa$ 및 $H_b KVAb$ 라고 하면 a 機의 等價慣性定數 $H_{eq}(a)$ 는 다음 式에 依하여 주어진다.

$$H_{eq}(a) = \frac{H_a}{1 + \frac{H_a KVAa}{H_b KVAb}}$$

本文計算에서는 受電端에는 同期電動機가 連結되지 않은 狀態로서 慣性定數 H 는 10KW-sec/KVA 를 採擇하였다. 參考로 一般機器의 慣性定數의 크기를 알아보면 水車發電機는 3~4, 蒸氣 turbine 發電機는 5~10, 同期調相機는 1~2, 同期電動機는 2~2.5, 誘導電動機는 0.5 이다.

7.5 過渡安定度の 實算

(1) 電力一位相角

京仁地區와 釜山地區를 連絡하는 345KV 送電系統은 그림 7.9 로서 表現할 수 있으며, 力率 1.0 750MW 의 電力을 釜山地區에서 京仁地區로 送電하고 있을 때 兩回線中 1 回線이 中間地點에서 大地를 通한 相間短絡을 誘發하였을 時, 故障線路를 몇 cycle 內에 開放하면 同期發電機의 脫調現象를 防止하고 繼續해서 750MW 의 電力을 送電할 수 있는지 檢討하고자 한다. 그리고 計算에 必要한 諸定數는 아래와 같이 推定하였다.

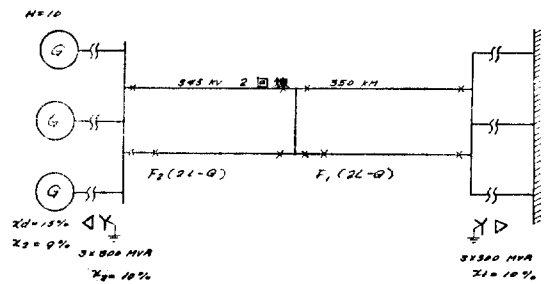


그림 7.9

送電端,

3×300MVA, 3相, 60 ∞ Turbe-Generator

無飽和同期 Reactance 120%

定格電流過渡 Reactance 15%

逆相過渡 Reactance 9%

慣性定數(Inertia constant) 10 KW-sec/KVA

變壓器,

3×300MVA, 3相 60 ∞ 送變電端에 連結됨. Reactance=10%, 勵磁電流는 無視함.

受電端,

受電端變壓器의 低壓側은 無限大母線에 連結되며, 受電端低壓側은 規定值의 95%에 維持된다고 假定한다.

回路定數,

單位法를 使用하며, base 는 900MVA 를 採擇한다.

$$\text{規定電流 } I_n = \frac{900,000}{\sqrt{3} \times 345} = 1,510 \text{ A}$$

$$\text{規定電壓 } E_n = 345 / \sqrt{3} = 200 \text{ KV}$$

$$\text{規定 Impedance } Z_n = \frac{200 \times 10^3}{1,510} = 132.5 \Omega$$

計算의 첫段階로서, 系統各定數를 單位法으로 轉換해야 한다.

300MVA 를 基準한 發電機의 %reactance 는 900MVA 에서는 3 倍가되거나 3 個의 發電機가 並列連結됨으로, 實際使用値는 變動이 없다. 送電線의 正相 및 逆相 reactance 는 132.2Ω, 零相 reactance 는 1 回線에 對하여 377Ω 이고, 平行 2 回線에 對해서는 276Ω 이다. 따라서 線路 reactance 는 345KV, 900MVA base 時 單位法으로 아래와 같이 表現할 수 있다.

1 回線 :

正相 및 逆相 reactance (x_1, x_2)	$j1.00$
零相 reactance (x_0)	$j2.85$

2 回線 :

正相 및 逆相 reactance (x_1, x_2)	$j0.50$
零相 reactance (x_0)	$j2.08$

送電系統에 있어 普通系統의 어떤 重要點에서 電壓은 一定하게 維持된다. 이 境遇에 있어서는 受電端低壓側 母線電壓이 95%로 維持된다고 假定한다. 그러면 送電端의 發電機端子電壓이 어떻게 되는지 計算해 볼 必要가 있다. 따라서 送受電端間의 兩母線의 綜合系統 reactance (x_s)를 求하면 $x_s = j0.7$ 即 92.8Ω 이다. 受電端低壓母線에 傳達되는 負荷는 力率에서 750MW (0.833 單位法)이다. 線路에 흐르는 電流는

$$I = \frac{0.833}{0.95} = 0.877 = 1.322 \text{ Amp}$$

이 電流가 흐름에 따르는 送電端發電機端子電流는

$$E_s = 0.95 + 0.877(j0.7) = 0.95 + j0.612$$

$$= 1.13e^{j32^\circ 45'}$$

$$E_s = 225.5e^{j32^\circ 45'} \text{ KV (line-to-neutral)}$$

以上으로서 送受電端의 電力一位相角圖를 作成할 수 있는 資料는 具備되었다. 過渡安定度檢討에 있어, 第一 苛酷한 狀態는 系統에 故障이 發生하여 이 故障을 除去하는 過程에서 나타난다. 本計算에서는 大地를 통한 二線短絡事故가 한 回線의 送電端에서 發生하였고 故障回線의 兩端은 故障을 除去키 爲하여, 同時에 開放되었다고 假定하였다.

計算의 對象은 安定度가 維持되는 範圍內에서 故障發生後最大 몇 Cycle 內에 遮斷器가 動作하여 故障線을 開放하면되는지 決定하는데 있다. 本計算에서 二線이 大地를 통하여 相間短絡을 일으킨 狀態에서 過渡安定度を 檢討하게 된 理由는 系統安定度檢討에 있어 一般의으로 널리 採擇되고 있는 基準이므로 이에 準한 것이다.

第一次段階計算은 下記의 세가지 條件下에서 電力一位相角圖를 作成해야 한다.

- (1) 故障이 發生하기 直前의 初期條件.
- (2) 故障下의 中間條件.
- (3) 故障이 除去된 直後의 最終條件.

本系統은 受電端에 無限大母線을 假定하였으므로, 受電端位相角은 一定位置에 維持되므로 送電端에서만 電力一位相角圖를 作成하면 足하다. 따라서 電力損失을 無視한 本系統의 送電端電力一位相角式은 아래와 같다.

$$P_s = \frac{\bar{E}'_{d-s} \bar{E}_{\infty-R}}{x} \cos(90^\circ + \theta)$$

本式에서 θ 는 內部電壓 \bar{E}'_{d-s} 와 $\bar{E}_{\infty-R}$ 間의 位相角差이다. 電力一位相角圖는 過渡現象에 對한 것이므로, 過渡 Reactance 에 對한 電壓 \bar{E}'_{d-s} 가 使用되어야 한다. 그리고 x 의 값은 發電機過渡 reactance x_d' 를 使用해서 決定해야 한다. 發電機內部電壓은 發電機의 端子電壓과 發電機過渡 reactance 를 通해서 負荷電流를 흐르게 하는 데 必要한 電壓과의 Vector 和이다.

$$E'_{d-s} = 0.95 + j0.612 + 0.877(j0.15) = 1.21e^{j38^\circ}$$

過渡現象에 取扱되는 時間은 大端히 짧으므로 發電機 內部電壓은 一般의으로 一定하다고 看做되어 上記 E'_{d-s} 의 값은 全計算을 通하여 그대로 使用된다.

(1) 事故發生前 :

事故가 發生하기 前의 送電端電力을 計算하는데 使用된 系統 및 回路定數는 그림 7.10 에 表示된 바와 같다.

$$P_s = \frac{(1.21)(0.95)}{0.85} \cos(90^\circ + \theta)$$

$$= -1.35 \cos(90^\circ + \theta) \tag{7.2}$$

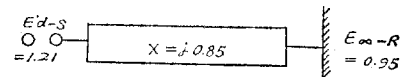
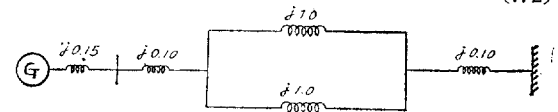


그림 7.10 單機系統, 事故發生前의 系統

(2) 二線一大地間短絡事故中,

故障下의 電力一位相角圖를 作成하는데 있어 첫 段階의 計算은 逆相 및 零相回路를 故障點에 代入할 수 있도록 하나의 等價 reactance 로 換算해야 한다. 前記한 逆相 및 零相回路定數를 使用하여 關係兩回路를 圖示하면 그림 7.11 의 (a) 및 (b)와 같다. 그리고 兩圖右側에 있는 것은 各回路를 等價 reactance 로 各各 轉換한 것이다. 이 兩等價 reactance 는 故障狀態가 二線接地短絡이므로 並列로 連結된 다음에 故障點에 插入하여, 故障種類에 따르는 等價回路를 求한다. 이것이 (c)圖이며 c圖의 回路를 다시 Y-D 轉換法에 依하여 簡略化하면 簡單한 回路인 (d)圖로 變化된다. 이 π 回路의 並列部分은 電力

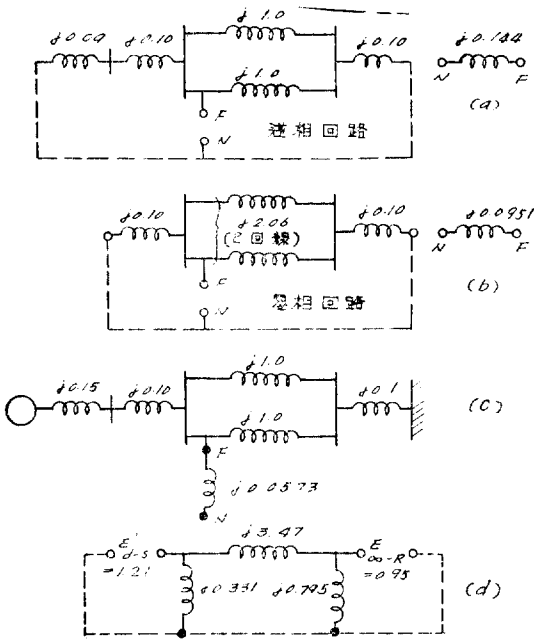


그림 7.11 單機系統, 二線接地事故時의 回路
 (a) 逆相回路 (b) 零相回路
 (c) 故障中回路 (d) (c)의 轉換回路

一位相角式에 影響을 주지 않고 單純히 無効電力傳達에 만 影響을 미친다. 따라서 發電機內部電壓이 一定하고, 假定하여 事故發生前에 對한 電力一位相角公式에 使用한 電壓을 그대로 適用하여 電力一位相角關係式을 求하면 아래와 같다.

$$P_s' = -\frac{(1.21)(0.95)}{3.47} \cos(90+\theta) = -0.331 \cos(90+\theta) \quad (7.3)$$

(3) 故障回路가 除去된 後

故障回路가 系統에서 除去된 다음, 電力一位相角式 P_s'' 를 計算하는데 使用된 回路는 그림 7.12 와 같으며, 式은 아래와 같다.

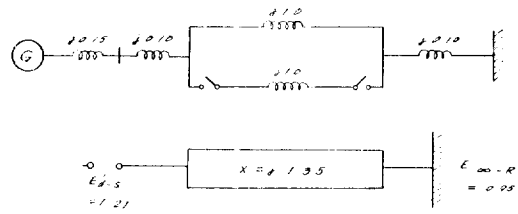
$$P_s'' = -\frac{(1.21)(0.95)}{1.35} \cos(90+\theta) = -0.852 \cos(90+\theta) \quad (7.4)$$

本式의 電力對位相角은 서울—釜山間線路中間地點에 中間開閉所를 두지 않은 境遇이며, 後記하는 바와 같이 事故回線除去後 送受電端의 reactance 가 增加하여 安定度를 維持할 수 없으므로, 中間開閉所를 두어, 事故時 事故回線의 2分之 1 區間만을 開放하여 事故를 除去하였다고 假定하면, 系統은 그림 7.13 와 같으며, 電力一位相角式은 아래와 같다.

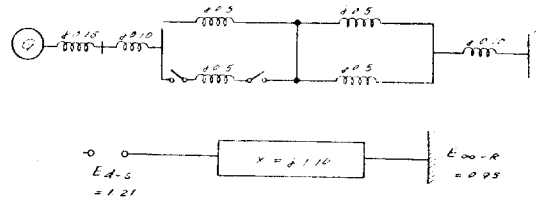
$$P_s''' = -\frac{(1.21)(0.95)}{1.1} \cos(90+\theta) = -1.05 \cos(90+\theta) \quad (7.5)$$

(2) 電力一位相角圖 및 位相角極限值

前項에서 計算한 電力一位相角各式을 作圖하면 附圖



單機系統, 事故發生前 事故回線開放 (530MW / 2 回線)



單機系統, 事故發生前 事故回線開放 (350MW / 2 回線)

그림 12

V 와 같으며 各條件下에 單機系統으로서 取扱된다. 本圖를 檢討해 보면 中間開閉所가 없을 境遇는 2回線으로 530MW 까지 送電할 수 없으며 遮斷器가 瞬間 빨리 動作하여도 2回線 750MW 送電時는 過渡安定度는 維持되지 않는다는 것이 判明되었다. 따라서 過渡安定度는 中間開閉所를 設置한 系統으로서, Curve I, II 및 IV 를 對象으로 하여 檢討키로 한다.

事故前發電機는 受電端에 對하여 $38^{\circ}06'$ 의 位相角으로서 750MW 의 電力을 Curve I 上의 1 位置에서 運轉되고 있었으며, 한편 Critical Angle 는 受電端에 對하여 $127^{\circ}26'$ 이다. 故障中에는 Curve II 上의 2~3 位置에 따라 電力이 送電되고, 位相角 δ 까지 到達하기 前에 故障區間이 除去되어 電力은 Curve IV 에 따라 送電되어야 한다. 그리고 位相角 δ 는 面積 1234 와 面積 456 等價이라는 條件下에서 算出한다. 即 位相角 δ 를 等價面積에 依하여 求해보면

$$\begin{aligned} \text{面積 } 1234 &= (\delta - 0.665) \times 0.833 - \int_{38^{\circ}06'}^{\delta} 0.331 \sin \theta d\theta \\ &= 0.833\delta - 0.331 \cos \delta - 0.8145 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{面積 } 456 &= \int_{\delta}^{127^{\circ}26'} 1.05 \sin \theta d\theta - 0.833(2.224 - \delta) \\ &= 1.05 \cos \delta - 1.211 + 0.833\delta \end{aligned}$$

上記兩面積은 等價라야 함으로

$$0.833\delta + 0.331 \cos \delta - 0.815 = 1.05 \cos \delta - 1.2 + 0.833\delta$$

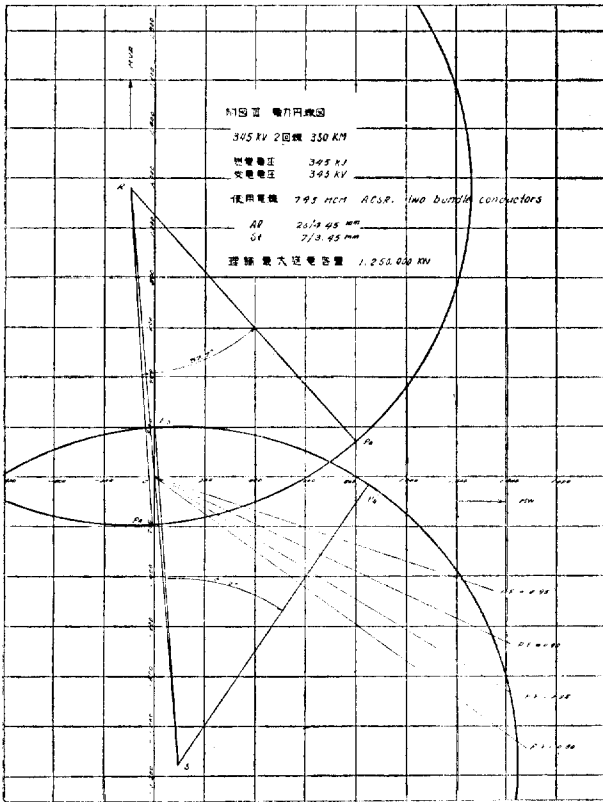
$\therefore \cos\delta=0.550 \quad \delta=56^{\circ}36'$

이다.

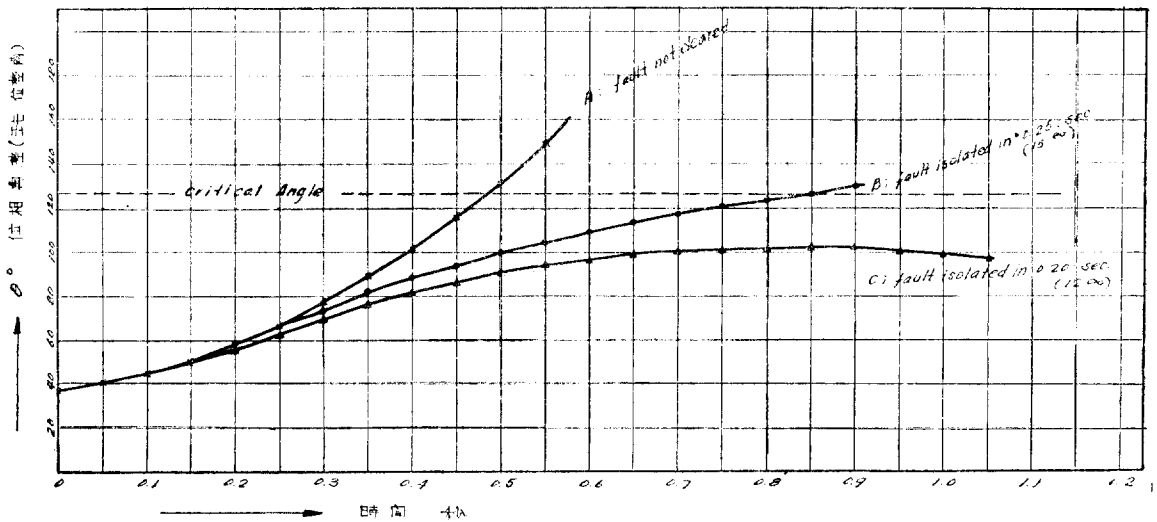
다음 $H=10KW\text{-sec/KVA}$, $K=1.080$ 이라는 결과를 이용하여 7.2表和 같은 位相角-時間曲線表를 作成한다. 7.2表 (a)는 系統에 二線接地事故가 發生한 後, 位相角이 $56^{\circ}36'$ 를 超過하는 時間이 經過하여도 이것을 除去치 않고 放置해 두면 位相角이 漸漸 커져서 過渡安定度는 維持되지 않고 發電機는 脫調한다. 이것을 圖示하면, 그림 7.13 A 曲線과 같다.

7.2表 (b)는 事故回線을 事故發生後 0.25秒에 即 位相角差가 $58^{\circ}49'$ 에 到達한 15 ∞ 經過時에 除去하면 어떻게 되는지 檢討한 것이며, 그 結果는 亦是 發電機는 脫調한다. 이것을 圖示하면 그림 7.13의 B 曲線과 같다. 그리고 7.2表(c)는 事故回線을 事故發生後 0.2秒 即 位相角差가 $51^{\circ}47'$ 에 到達한 12 ∞ 經過時에 除去하면 어떻게 되는지 檢討한 것이다. 그 結果는 51 ∞ 以後에는 位相角差가 漸次 줄어들이 過渡安定度는 維持된다. 이것을 圖示하면 그림 7.13의 C 曲線과 같다.

345KV 送電線의 保護繼電器動作을 包含한 遮斷器動作時間은 6 ∞ 程度이므로, 前記 12 ∞ 보다 下廻한다. 따라서 過渡安定極限送電電力은 始初 推定值 750MW 보다 若干큰 數字가 될 것이다.



附圖 V



345KV 350KM double circuits
under; two lines short circuited through
ground; transmitted power 750 MW
그림 7.13

位差角—時間曲線

$$H = \frac{0.231(WR^2)(RPM)^2}{Base\ KVA} \times 10^{-6} = 10KW\text{-sec}/KVA$$

$$K = \frac{180f}{(H)(KVA)} = \frac{180 \times 60}{10 \times 1} = 1,080 \alpha = \frac{180(f)(\Delta P)}{(H)(KVA)} = K\Delta P \text{ 度/秒/秒}$$

(a) 事故回線無除去時……脫調

(1) 區間始初 時間 (秒)	(2) 區間始初 角 相差	(3) 電氣出力 (unit HP)	(4) ΔP , 機 械入力 電氣出力	(5) 加 速 度 (度/秒/ 秒)	(6) 加 速 增 加 時 (秒)	(7) 速 度 變 化 (度/秒)	(8) 速 度 (度/秒)	(9) 位 差 角— 時 間 增 加 時 間	(10) 角 度 變 化 (度)	(11) θ 의 最 終 角 度 (度)
—	—	—	0.833-(3)	(4)×K	—	(5)×(6)	(7)+(8) _{n-1}	—	(8)×(9)	(10)+(2)
0.0	38.10	0.204	0.629	679.8	0.025	16.97	16.97	0.05	0.849	38.95
0.05	38.95	0.2072	0.6258	675.0	0.05	33.75	50.72	"	2.536	41.49
0.10	41.49	0.219	0.614	663.0	"	33.08	83.78	"	4.170	45.66
0.15	45.66	0.2366	0.5964	645.0	"	32.25	116.07	"	5.810	51.47
0.20	51.47	0.2586	0.5744	620.0	"	31.00	147.07	"	7.352	58.82
0.25	58.82	0.283	0.550	594.0	"	29.70	176.77	"	8.840	67.66
0.30	67.66	0.305	0.528	571.0	"	28.50	205.27	"	10.250	77.91
0.35	77.91	0.323	0.510	552.0	"	27.6	232.87	"	11.620	89.53
0.40	89.53	0.330	0.502	541.0	"	27.1	259.97	"	13.00	102.53
0.45	102.53	0.323	0.511	551.0	"	27.6	287.57	"	14.350	116.88

(b) 事故回線을 事故發生後 0.25秒時 除去……脫調

-0.25	58.82	0.283	0.550	594.0	0.025	14.85	161.92	—	—	—
+0.25	58.82	0.898	-0.065	-70.0	"	-1.75	160.17	0.05	8.008	66.83
+0.30	66.83	0.960	-0.127	-137.0	0.05	-6.85	153.32	"	7.665	74.50
+0.35	74.50	1.010	-0.177	-192.0	"	-9.56	143.76	"	7.19	81.69
+0.40	81.69	1.036	-0.203	-219.0	"	-10.90	132.86	"	6.65	88.34
+0.45	88.34	1.050	-0.217	-234.0	"	-11.70	121.16	"	6.08	94.42
+0.50	94.42	1.045	-0.212	-229.0	"	-11.42	109.74	"	5.48	99.90
+0.55	99.90	1.033	-0.200	-216.0	"	-10.80	98.94	"	4.95	104.85
+0.60	104.85	1.014	-0.181	-196.0	"	-9.77	89.17	"	4.45	109.30
+0.65	109.30	0.988	-0.155	-167.7	"	-8.38	80.79	"	4.03	113.33
+0.70	113.33	0.963	-0.130	-140.3	"	-7.02	73.77	"	3.68	117.01
+0.75	117.01	0.935	-0.102	-110.0	"	-5.50	68.27	"	3.41	120.42
+0.80	120.42	0.905	-0.072	-78.0	"	-3.90	64.37	"	3.21	123.63
+0.85	123.63	0.875	-0.042	-45.4	"	-2.26	62.11	"	3.11	126.74
+0.90	126.74	0.841	-0.008	-8.64	"	-0.43	61.68	"	3.08	129.82

(c) 事故回線을 事故發生後 0.20秒時 除去……安定維持

-0.20	51.47	0.2586	0.5744	620.0	0.025	15.50	131.57	—	—	—
+0.20	51.47	0.82	0.011	11.9	0.025	0.3	131.87	0.05	6.6	57.98
+0.25	57.98	0.89	-0.057	-61.5	0.05	-3.08	128.29	"	6.44	64.42
+0.30	64.42	0.946	-0.113	-122.0	"	-6.1	122.69	"	6.13	70.55
+0.35	70.55	0.990	-0.157	-170.0	"	-8.5	114.19	"	5.71	76.26
+0.40	76.26	1.02	-0.187	-202.0	"	-10.1	104.09	"	5.21	81.47
+0.45	81.47	1.037	-0.204	-220.3	"	-11.01	93.08	"	4.66	86.13
+0.50	86.13	1.05	-0.217	-234.2	"	-11.7	81.38	"	4.07	90.20
+0.55	90.20	1.05	-0.217	-234.2	"	-11.7	69.68	"	3.48	93.68
+0.60	93.68	1.05	-0.217	-234.2	"	-11.7	57.98	"	2.89	96.57
+0.65	96.57	1.032	-0.199	-215.0	"	-10.75	47.23	"	2.49	99.06