

相似型電子計算機에 의한 寧越·富平間 送電系統의 過渡安定度 解析

報 告

15-1-2

(Transient Stability Analysis of the Yongwol·Bupyong Power System by Electronic Analog Computer Techniques)

韓 萬 春* · 李 興 九**
(Han Man Choon · Lee Hung Ku)

ABSTRACT

Transient stability analysis of Yongwol-Bupyong power system, which contains Yongwol steam power station, the largest one in Korea, was undertaken by using the Yonsei 101 Analog computer. The critical switching time and phase angle for the present 150 MW power flow to be stable were found. And the transient stability power limit for the system was also found.

It is concluded that the system becomes unstable if the power flow increases much more than 151 MW.

1. 序 論

우리 나라에서 産業發展의 原動力이 되는 電源開發은 進涉되어 韓國電力 系統의 全 發電設備容量은 1965 年末 現在 76.9 萬 KW(可能出力 72 萬 KW)이다. 電源開發 五 個年 計劃에 따라 新規 大容量 大力發電所가 新設되고 있으나 送電系統의 安定度에 對한 理論的解析은 이루어 지지 않고 있으며 外國에서는 超高壓送電이 實施되고 있음에도 不拘하고 送電電壓은 154 KV 를 아직도 벗어나지 못하고 있다. 本稿에서는 우리 나라 電力系統의 過渡安定度를 解析하는 하나의 試圖로서 國內에서 最大容量을 갖는 寧越火力發電所(新火力 110 MW, 舊火力 75 MW)와 富平變電所間을 2 機系統으로 생각하고 延世 101 相似型電子計算機¹⁾를 使用하여 過渡安定度를 解析하므로써 現在의 系統에 對한 檢討를 하는 同時에 將來出力이 더욱 增加되는 境遇에 必要한 資料를 얻으려고 하는 것이다.

2. 寧越 富平間 送電系統의 過渡安定度 解析

送電系統故障에 對한 過渡安定도는 故障種類, 故障場所, 및 故障後 故障點을 遮斷하는 方法과 速度에 따라

決定된다. 本 寧越 富平間 三相二回線 系統의 過渡安定度 解析에서는 故障後 擾亂이 크다고 볼 수 있는 寧越 尙州間의 一回線 中央點을 故障場所로 잡는다. 系統故障은 擾亂이 큰 短絡故障과 接地故障으로서

- 三相短絡(3 ϕ)
- 二線接地(L-L-G)
- 線間短絡(L-L)
- 一線接地(L-G) 를 생각한다.

위의 네가지 중에서 가장 甚한 故障에 對하여 過渡安定도를 維持하면서 送電을 繼續할 수 있는 遮斷器의 臨界遮斷時間과 臨界負荷角을 決定한다. 여기서 故障點은 同時에 遮斷된다고 본다.

또 現 寧越 尙州間에서 故障이 이리 난후 寧越의 第1 繼電器와 尙州의 第2 繼電器가 各各 7cycle 과 26 cycle 에서 계단적으로 動作한다고 본다. 이때 送受電端電壓을 一定하게 維持된다 하고 過渡安定極限電力을 求한다.

A. 系統構成

1965 年末 現在韓國電力系統의 主要系統圖는 그림 2-1

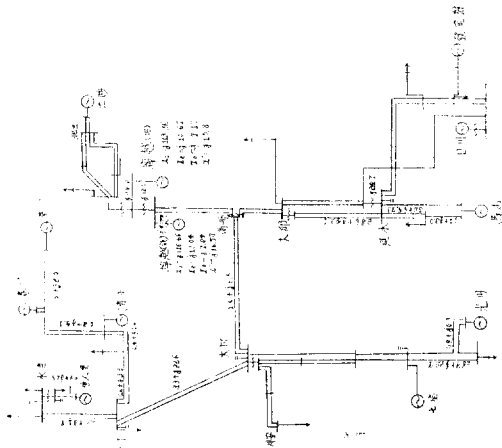


그림 2-1 韓國電力 主要系統圖
(%임피던스 100 MVA, 154 KV 基準)

* ** 延世 理工大 電氣工學科

Dept. of Electrical Eng.
College of Science & Engineering,
Yonsei University.

과 같다. 主要發電所는 4個水力發電所(華川, 春川, 淸平, 七寶와 6個汽力發電所(三陟, 寧越(新, 舊), 馬山, 甘川, 唐人里), 및 2個內燃力發電所(光州, 發電艦)로서 送電系統은 154 KV 系統을 主幹線으로 하고 있다. 그림 2-1에서 尙州를 中心으로한 東北地區의 寧越(新, 舊), 三陟火力發電所의 總 可能出力 24萬kw(寧越新 11萬kw, 寧越舊 7萬5千kw, 三陟 5萬5千kw)中 9萬kw가 東北地區 自體負荷에서 消費된다고 보면 寧越尙州間 最大電力 潮流는 15萬kw로 볼 수 있다. 또한 東南地區의 馬山, 甘川, 發電艦의 發電電力은 尙州以南의 同地區負荷에서 消費되고 其中 3萬kw가 尙州方面으로 流入된다고 보면 尙州, 大田間線路의 電力 潮流는 18萬kw로 볼 수 있다. 大田으로 輸送되는 電力은 大田變電所의 負荷와 富平變電所의 서울地區 負荷에서 消費되고 負荷力率은 富平負荷 91%, 大田負荷 93%로 본다. 그러면 다음과 같은 假定下에 寧越 富平間 2機系統을 構成하면(그림 2-2)와 같다.

- a) 寧越 富平間 輸送電力을 全 寧越發電所出力으로 한다.
- b) 東南地區에서 尙州로 流入되는 電力3萬KW無視한다
- c) 富平和 大田의 分擔負荷는 富平 大田間 集中負荷로 보고 이를 無限大母線으로 한다.
- d) 集中負荷力率은 92%로 한다.
- e) 電線路의 抵抗은 리액탄스에 비해 작으므로 이를 無視한다.
- f) 受電端 變壓器의 리액탄스는 送電端變壓器와 같다고 생각한다.

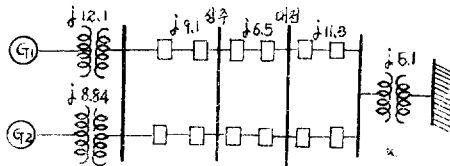


그림 2-2 寧越 富平 系統
(% 리액탄스 100 MVA, 154 KV 基準)

B) 系統方程式

寧越 汽力發電所의 2極, 3600[rpm]의 同期發電機는 非凸極同期發電機特性에 準해서 解析하면 故障中 出力은 다음과 같다.

$$p = \frac{e_i e_t}{x' d} \sin \delta \tag{2-1}$$

여기서 e_i : 過渡리액탄스 內部電壓
 e_t : 發電機의 端子電壓
 $x' d$: 發電機의 直軸過渡리액탄스

過渡安定度 解析을 爲한 基本方程式은 다음과 같이 된다.⁽²⁾

$$M_0 \frac{d^2 \delta}{dt^2} = p_i - \frac{E_1 E_2}{x_{12}} \sin \delta_{12} \tag{2-2}$$

여기서 M_0 : 發電機의 等價慣性定數
 p_i : 同期出力
 E_1 : 發電機의 過渡리액탄스 內部電壓
 E_2 : 無限大母線電壓
 x_{12} : E_1, E_2 間 傳達리액탄스
 δ_{12} : E_1, E_2 間 相差角

式(2-2)에 本系統에 該當되는 定數와 初期值를 設定 代入하여 本系統의 過渡安定度解析을 爲한 系統方程式을 얻는다. 여기서 定數와 初期值는 無限大母線電壓을 154 KV로 보고 現 150 MW 負荷의 力率 92%를 考慮하여 163 KVA, 154 KV를 基準으로 換算한 퍼·유니트值를 使用한다.

a) 等價慣性定數 M_0

出力 25 MW인 發電機 4臺가 並列運轉되고 있는 寧越舊火力 發電所의 發電機 慣性性能率은 表 2-1과 같다.

表 2-1 發電機 慣性 性能率

	慣性性能率 $WR^2(ib-ft^2)$
1號機(25MW)	$(WR^2)_1 = 3.98 \times 10^4$
2號機(25MW)	$(WR^2)_2 = 2.59 \times 10^4$
3號機(25MW)	$(WR^2)_3 = 3.8 \times 10^4$
4號機(休止中)	$(WR^2)_4 = 3.98 \times 10^4$

表 2-1에서 單位慣性定數 H [KW-sec/KVA]는 各機에 對하여

- 1號機: $H_1 = 0.729$ [KW-sec/KVA]
- 2號機: $H_2 = 0.697$ [KW-sec/KVA]
- 3號機: $H_3 = 0.478$ [KW-sec/KVA]

이다.

다음 出力 55 MW인 發電機 2臺가 並列運轉되고 있는 寧越新火力發電所의 發電機慣性性能率의 正確한 값은 알려져 있지 않으므로 各種 터빈 發電機의 單位慣性定數의 平均值⁽³⁾에서 發電機의 運轉力率을 85%로 보고 구하면 新火力 55 MW 發電機의 單位慣性定數는

$$H_4 = 1.11$$
 [KW-sec/KVA]로 된다.

以上에서 全寧越發電機群을 1機로 본 單位慣性定數 H [KW-sec/KVA]는

$$H = H_1 + H_2 + H_3 + 2H_4 = 4.131$$
 [KW-sec/KVA]

따라서 퍼·유니트 慣性定數는

$$M_0 = 5.083 \times 10^4$$
 [p·u]

b) 初期 過渡內部電壓 및 初期 負荷角 E_1, δ_{12} .

그림 2-2에서 100 MVA, 154 KV를 基準으로 한 % 리액탄스를 163 MVA, 154 KV를 基準으로 한 퍼·유니트로 환산한 다음 系統 正相分 다이아그람을 그리면 그림 2-3과 같다.

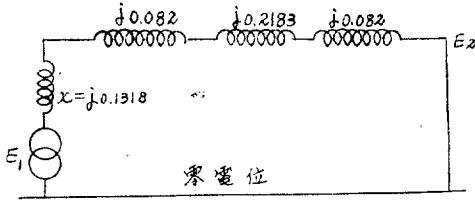


그림 2-3 系統正相분 다이어그램

(피·유니트 리액탄스 163MVA, 154KV 基準)

그림 2-3에서

無限大母線電壓 $E_2=1[p.u]$

負荷電流 $I_L=1[p.u]$

發電機의 初期過渡內部電壓 $E_1=1.292[p.u]$

初期負荷角 $\delta_{12}=21.8^\circ$

이 된다.

c) 入力 P_i

定常狀態에서의 同期出力으로서 150MW 負荷에서는

$$P = E \cdot I \cos\theta = 0.92 [p.u]$$

이다.

d) 故障系統의 傳達리액탄스 x_{12}

不平衡故障에서 系統傳達리액탄스는 等價正相리액탄스 x_f 를 故障點과 並列로 넣고 平衡回路로 생각해서 구한다.

等價正相리액탄스 x_f 를 求하기 위한 正相, 逆相, 零相分回路는 그림 2-2에서 그림 2-4와 같이 된다. 여기서 線路 相互리액탄스와 變壓器의 接地抵抗은 無視하고 線路의 零相리액탄스는 正相리액탄스의 3배로 한다. 그림 2-4에서 故障點에서 본 逆相(x_2), 零相리액탄스(x_0)는

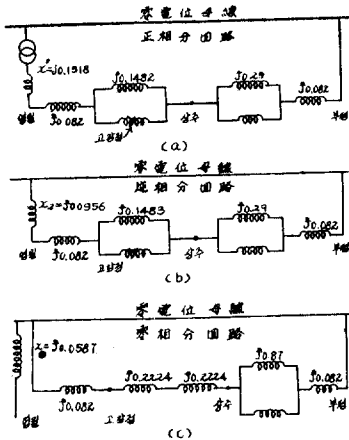


그림 2-4. 寧越 富平間系統 正相, 逆相, 零相回路

(피·유니트 리액탄스 163MVA 154KV 基準)

$$x_2 = j0.13705 [p.u]$$

$$x_0 = j0.2155 [p.u]$$

이다.

따라서 故障別 等價正相리액탄스(x_f)는 表 2-2와 같이 된다.

表 2-2 故障別 等價正相리액탄스

故障 種類	x_f
三相短絡(3 ϕ)	0
線間短絡(L-L)	$x_2 = j0.13705$
1線接地線(L-G)	$x_i + x_0 = j0.35255$
2線接地(L-L-G)	$x_2 \cdot x_0 / x_2 + x_0 = j0.0838$

그림 2-4(a)에서 系統 傳達리액탄스(x_{12})를 求하기 爲한 다이어그램은 그림 2-5(a)이고 이것을 Δ -Y 變換하면 그림 2-5(b)와 같이 된다. 또한 寧越第 1 繼電器 動作시간부터 尙州第 2 繼電器 動作시간 까지에 作用하는 傳達리액탄스(x_{12}')는 그림 2-5(c)로 된다.

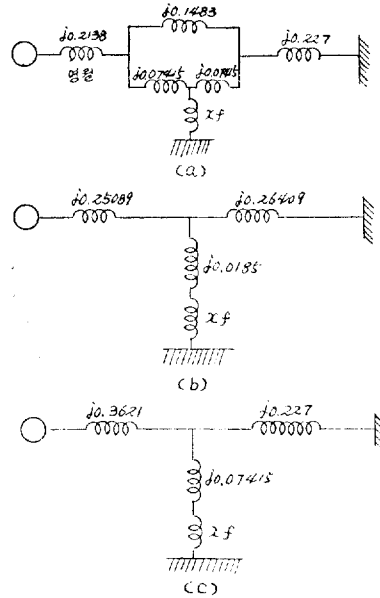


그림 2-5. 傳達리액탄스

그림 2-5 (b), (c)에서 故障系統의 傳達리액탄스는

$$x_{12} = 0.51498 + \frac{0.0663}{0.0185 + x_f} [p.u] \quad (2-3)$$

$$x_{12}' = 0.589 + \frac{0.08217}{0.07415 + x_f} [p.u] \quad (2-4)$$

그러므로 그림 2-6 과 같은 故障別出力 角特性曲線을 얻을 수 있다.

여기서 3相短絡 故障이 가장 甚한 系統擾亂을 일으키는 것을 알 수 있다.

以上에서 過渡安定度解析을 爲한 系統方程式을 다음과 같이 求할 수 있다.

a) 現 尙州 大田間 電力潮流 150 MW는 가장 重要한 서울負荷에 供給되므로 系統故障中 擾亂이 가장 크다고

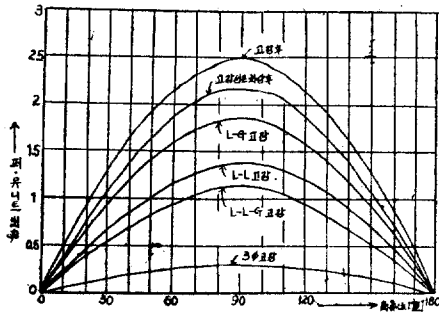


그림 2-6. 故障別 出力-角特性曲線(150MW)

볼 수 있는 寧越 尙州間 3相短絡故障點을 同時遮斷하여 臨界遮斷時間과 負荷角을 決定하다. 이 境遇 系統方程式은 前述한 初期值를 式(2-2)에 代入하면 다음과 같이 된다.

$$5.083 \times 10^{-4} \frac{d^2\delta}{dt^2} = 0.92 - 0.316 \cdot \sin\delta_{12} \quad (2-5)$$

$$(\delta_{12} = 21.8^\circ)$$

b) 安定度の 觀點에서 送電 容量의 基準은 安態安定度, 1線接地故障, 2線接地故障 및 3相短絡故障 등이 檢討의 對象이 된다. 本稿에서는 寧越 富平間系統이 重要한 幹線인 만큼 寧越 尙州間 線路 中央點에서 3相短絡故障이 일어날 境遇 그 過渡安定極限電力을 基準으로 한다. 따라서 送受電端電壓을 一定하게 維持하고 過渡安定極限電力을 求하기 爲한 系統方程式은 다음과 같다. 여기서 故障線路는 7 cycle 과 26 cycle 에서 階段的으로 遮斷된다고 본다.

$$140[MW] : 5.083 \times 10^{-4} \frac{d^2\delta}{dt^2} = 0.858 - 0.316 \sin\delta_{12} \quad (\delta_{12} = 20^\circ) \quad (2-6-a)$$

$$145[MW] : 5.083 \times 10^{-4} \frac{d^2\delta}{dt^2} = 0.89 - 0.316 \sin\delta_{12} \quad (\delta_{12} = 20.8^\circ) \quad (2-6-b)$$

$$150[MW] : 5.083 \times 10^{-4} \frac{d^2\delta}{dt^2} = 0.92 - 0.316 \sin\delta_{12} \quad (\delta_{12} = 21.8^\circ) \quad (2-6-c)$$

$$151[MW] : 5.083 \times 10^{-4} \frac{d^2\delta}{dt^2} = 0.925 - 0.316 \sin\delta_{12} \quad (\delta_{12} = 21.9^\circ) \quad (2-6-d)$$

$$153[MW] : 5.083 \times 10^{-4} \frac{d^2\delta}{dt^2} = 0.9385 - 0.316 \sin\delta_{12} \quad (\delta_{12} = 22^\circ) \quad (2-6-e)$$

$$155[MW] : 5.083 \times 10^{-4} \frac{d^2\delta}{dt^2} = 0.95 - 0.316 \sin\delta_{12} \quad (\delta_{12} = 22.2^\circ) \quad (2-6-f)$$

$$160[MW] : 5.083 \times 10^{-4} \frac{d^2\delta}{dt^2} = 0.982 - 0.316 \sin\delta_{12} \quad (\delta_{12} = 23.03^\circ) \quad (2-6-g)$$

3. 씨뮤레이타 構成

A. 씨뮤레이타 構成

表 3-1. $P_i, E_1E_2/x_{12}, \delta_{12}$

P_i [MW]	P_i [p · u]	故障中 (3φ)			初期負荷角 [度] δ_{12}
		第1繼電器動作後 E_1E_2/x_{12}	水動作後 E_1E_2/x_{12}	故障線路遮斷後 E_1E_2/x_{12}	
140	0.858	0.316	0.7613	2.193	20
145	0.89	0.316	0.7613	2.193	20.8
150	0.92	0.316	0.7613	2.193	21.8
151	0.9255	0.316	0.7613	2.193	21.9
153	0.9385	0.316	0.7613	2.193	22.0
155	0.96	0.316	0.7613	2.193	22.2
160	0.982	0.316	0.7613	2.193	23.03

Simulate를 爲한 機械方程式은 表 3-1 에서 表 3-1 과 같이 된다.

表 3-2 機械方程式

P_i [MW] (V_{50})	故障中(3φ)	第1繼電器動作後	故障線路遮斷後
140 (5V)	$\frac{d^2V_\delta}{dt^2} = 4.22$ $-1.522\sin(V_\delta)$	$\frac{d^2V_\delta}{dt^2} = 4.22$ $-3.75\sin(V_\delta)$	$\frac{d^2V_\delta}{dt^2} = 4.22$ $-10.8\sin(V_\delta)$
145 (5.16V)	// = 4.38 //	// = 4.38 //	// = 4.38 //
150 (5.45V)	// = 4.525 //	// = 4.525 //	// = 4.525 //
151 (5.475V)	// = 4.56 //	// = 4.56 //	// = 4.56 //
153 (5.5V)	// = 4.615 //	// = 4.615 //	// = 4.615 //
155 (5.55V)	// = 4.67 //	// = 4.67 //	// = 4.67 //
160 (5.76V)	// = 4.83 //	// = 4.83 //	// = 4.83 //

이것은 演算器 最大出力電壓(±100V)를 考慮하여 最大 負荷角을 360°로 잡고 演算時間은 問題時間 0.1秒를 1秒로 스케일링 한 것이다.

函數發生器(F.G)의 最大入力電壓 50V, 最大出力電壓 25V를 考慮한 機械方程式의 씨뮤레이타 다이어그램은 그림 3-1 과 같다.

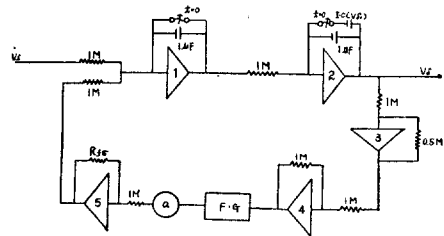


그림 3-1. 씨뮤레이타 다이어그램

그림 3-1에 對한 故障線路의 階段的 遮斷에 따라 變하는 演算素子值, 初期負荷角에 該當하는 初期電壓

$I \cdot C$ [V], 送電電力에 對한 入力壓電 V_i [V]의 값은 表 3-3과 같다

表 3-3. 그림 3-1에 對한 演算素子值, 初期 및 入力電壓

入力 P_i [MW]	故 障 中				第 1 繼 電 器 動 作 後		故 障 線 路 遮 斷 後	
	V_i [V]	$I \cdot C$ V_{30} [V]	a	R_{f5} [MΩ]	a	R_{f5} [MΩ]	a	
140	4.22	5	0.621	0.1	0.3	0.5	0.432	
145	4.33	5.16	0.621	0.1	9.3	0.5	0.432	
150	4.525	5.45	0.621	0.1	0.3	0.5	0.432	
151	4.56	5.475	0.621	0.1	0.3	0.5	0.432	
153	4.615	5.5	0.621	0.1	0.3	0.5	0.432	
155	4.67	5.55	0.621	0.1	0.3	0.5	0.432	
160	4.83	5.76	0.621	0.1	0.3	0.5	0.432	

B. 記 錄

一般的으로 送電系統의 過渡安定度는 故障後 大略1秒以內에서 判別이 可能하므로 本系統의 過渡安定度는 演算時間 10秒 以內에서 記錄 判別 解析한다.

1. 臨界遮斷時間과 負荷角

그림 3-2는 臨界遮斷時間과 臨界負荷角을 얻기 爲한 記錄으로서 (a), (b), (c), (d), (e)는 各各

- (a): 150MW ; 故障中の 境遇
- (b): 150MW ; 0.2秒 同時遮斷의 境遇
- (c): 150MW ; 0.3秒 //
- (d): 150MW ; 0.35秒 //
- (e): 150MW ; 0.45秒 //

이다.

2. 過渡安定極限電力

故障點을 階段的으로 7 cycle 과 26 cycle 에서 遮斷하는 경우 負荷를 增加하여 過渡安定極限電力을 求하기 爲한 記錄은 그림 3-3으로서 各各 (a), (b), (c), (d),

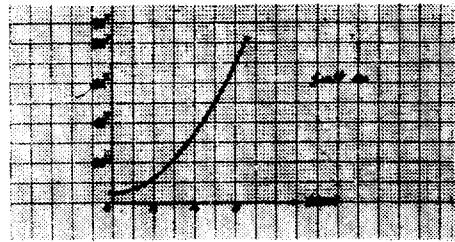
(e), (f), (g)는

- (a): 140 MW
- (b): 145 MW
- (c): 150 MW
- (d): 151 MW
- (e): 153 MW
- (f): 155 MW
- (g): 160 MW

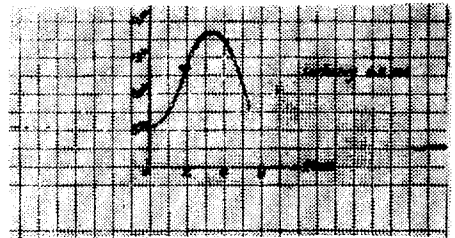
에 對한 것이다.

記錄速度는 5mm/sec이며 記錄紙의 橫軸 5mm는 0.1秒에 該當한다.

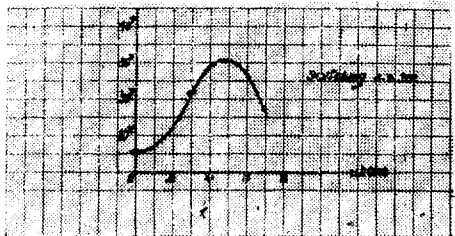
(a)



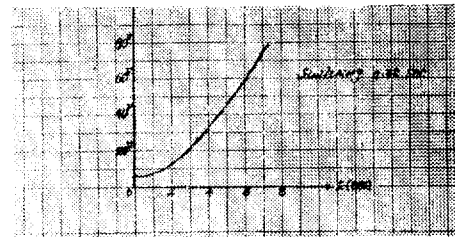
(b)



(c)



(d)



(e)

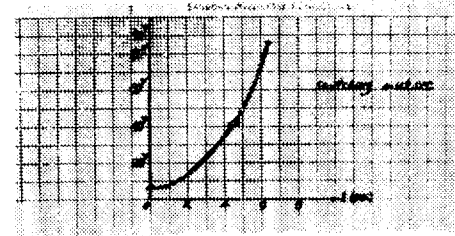
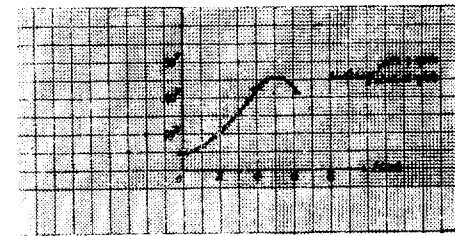


그림 3-2

(a)



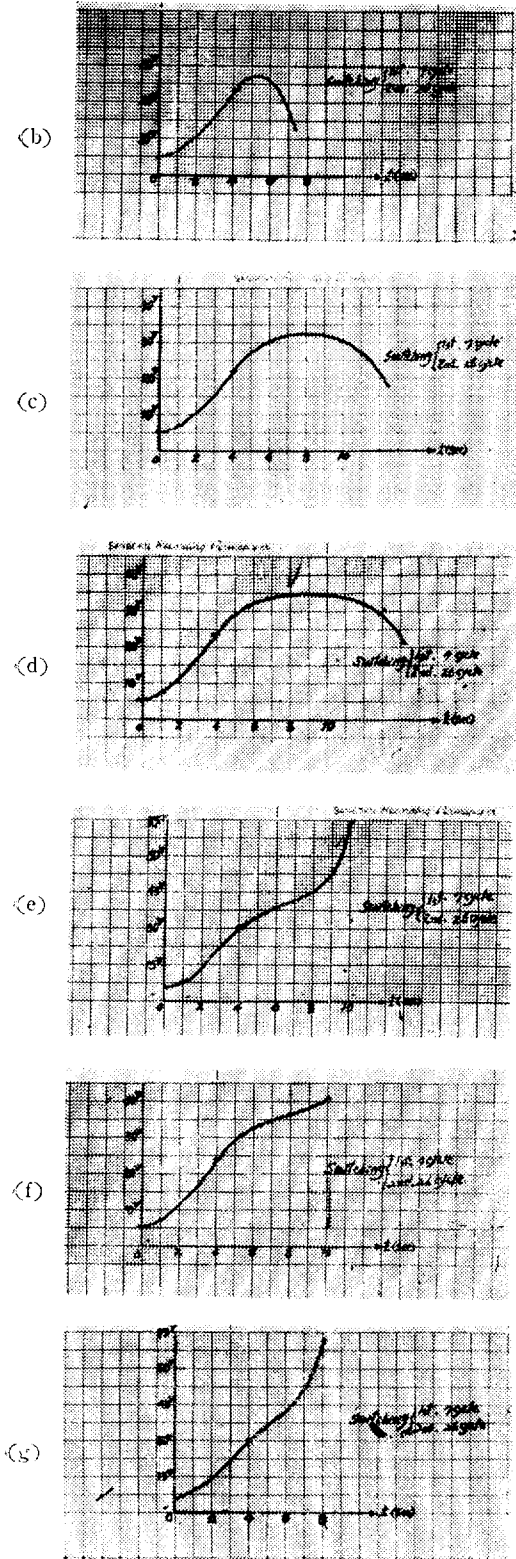


그림 3-3

4. 結果解析

A. 送電電力 150MW 인때 故障線路의 兩端이 同時에 遮斷되는 境遇에 過渡安定度を 綜持하면서 送電을 繼續할 수 있는 遮斷器의 臨界遮斷時間은 0.3秒와 0.35 秒 사이에 있으며 臨界角荷角은 122°附近에 存在함을 그림 3-2에서 알 수 있다.

B. 故障線路 兩端의 繼電器가 각각 7 cycle 과 26 cycle 에서 動作한다고 할때 送電電力增加에 따른 過渡安定極限電力은 그림 3-3에서 151 MW 程度로 됨을 알 수 있다.

그러므로 寧越 富平 系統의 現 設備와 基準電壓으로는 150 MW 以上の 出力 增加는 不可能하며 尖頭負荷時 寧越發電所는 尖頭發電所로 使用할 수 없음을 알 수 있다.

5. 結 論

延世 101 아나로그 컴퓨터를 使用하여서 寧越·富平 系統의 過渡安定度を 解析하였다.

2 機系統의 過渡安定度を 解析할 수 있었으므로 今後에는 多機系統의 解析으로 擴張하려고 한다.

6. 謝 意

貴重한 記錄器를 貸與하여 주신 原子力院 研究所當局 과 必要한 資料를 提供하여 주신 韓國電力 成樂正 技術 調査課長에게 深甚한 謝意를 表한다.

參 考 文 獻

1. 韓萬春; "延世 101 Analog computer" 延世大學校 八十週年記念論文集, 自然科學編, 1965年 5月
2. O.G.C Dahl; "Electric power circuits" McGraw-Hill Book Co, Inc. 1938
3. Selden B Crary; "power system stability" John wiley & Sons, Inc. 1955
4. 韓萬春 金俊鉉; "送電工學" 一潮閣, 1964
5. Harry. D. Huskey, Granino. A. Korn; "Computer handbook" McGraw-Hill book Co, Inc. 1962 (1966年 4月 1日 接受)