

154 KV 主幹線系統의 過渡安定度解析

技術解説

18-3-2

Transient Stability Analysis of 154 KV Main Transmission Lines.

宋 吉 永*
(Kil Yeong Song)

1. 緒 言

1968年 11月 3日을 기하여 우리나라 154KV 主幹線系統의 中性點接地方式이 從來의 PC 接地方式으로부터 直接接地方式으로 轉換되었다. 이 結果 系統의 運轉面에 있어서는 異常電壓上昇의 輕減, 高速度遮斷方式의 採用 등으로 供給信賴度가 한층 더 크게 向上 될것으로 期待되고 있다.

周知하는 바와같이 系統의 安定度는 定態(Steady-state) 및 過渡(Transient-state) 安定度の 兩者로 大別되지만 이 중 現段階의 系通運面에서 特別 重要한 地位를 차지하는 것은 後者의 過渡安定度 일것이다. 本文에서는

最近에 韓國電子計算所의 電子計算機(FACOM-222)를 使用하여 直接接地方式轉換後의 過渡安定度를 計算한 解析結果 및 앞으로 採用하여야 할 몇가지 安定度增進對策을 간단히 說明하고자 한다.

2. 計算條件

2-1 系統構成

本檢討에서는 1968年 末에서 1969年初 서울火力 #5가 系統에 併入 될때까지를 一次의인 計算의 對象期間으로 하였다. 따라서 이때의 系統構成은 그림 1에 보인 바와 같이 電源側으로서는 漢江系(華川, 春川, 衣岩 및 淸平發電所를 等價發電機로 置換), 서울火力(#1~#3) 寧越(新, 舊), 群山, 蔚山 및 釜山 發電機(#1~#3)의 6機系統으로 設定하고 送電系統側은 이때까지에 運轉될 東西線(寧越-德沼間) 1回線 및 蔚山-大邱 間 2回線을 包含하여 21 Node, 23 Branch의 規模로 整理하였다.

또 本計算에서 使用한 線路 임피던스는 正相 및 逆相 임피던스를 같다고 보고 正相 및 零相 임피던스만을 準備하였고 發電機의 等價리액턴스로서는 過渡리액턴스(x_d')를 擇하였다(表 1 參照)

表 1 Impedance值(%值, 154KV 100MVA Base)

線路區間	正相 Impedance	零相 Impedance	線路 Admittance
漢江-德沼	0.33+j1.64	2.016+j8.198	j6.01
德沼-道峰	0.74+j3.72	3.35+j14.2	j1.73
德沼-梧柳洞	1.66+j8.24	6.59+j24.95	j3.41
德沼-富平	2.01+j10.0	7.476+j27.19	j4.11
梧柳洞-富平	0.35+j1.76	0.883+j2.24	j0.73
富平-水色	0.54+j1.86	2.8+j9.11	j2.8
唐人里-水色	3.79+j12.75	9.15+j20.8	j0
富平-大田	3.31+j16.82	22.37+j53.91	j25.2
大田-裡里	3.21+j12.84	10.98+j44.9	j5.13
裡里-群山	1.01+j4.05	3.53+j14.65	j1.62
大田-尙州	1.63+j6.53	9.345+j37.35	j10.38
尙州-寧越	1.93+j9.17	12.76+j52.25	j14.84
寧越-德沼	7.33+j39.06	26.37+j102.35	j10.6
尙州-大邱	1.69+j7.88	11.02+j45.15	j12.76

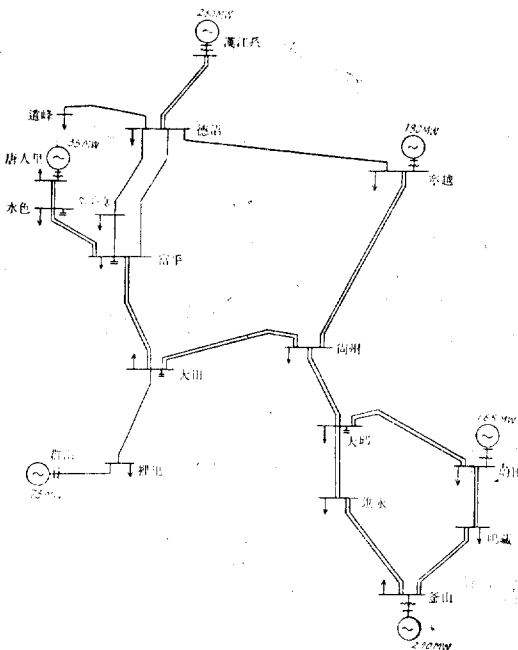


그림 1. 154KV 送電系統圖(1968, 末~1969, 初)

* 正會員: 韓國電力 技術部 系統計劃課長

154 KV 主幹線系統의 過度安定度解析

大邱—進永	1.37+j7.1	9.27+j 38.1	j 10.41
進永—釜山	1.32+j5.25	7.485+j30.4	j 8.54
釜山—鳴藏	0.57+j2.3	2.81+j 11.415	j 3.7
鳴藏—蔚山	1.05+j4.34	6.305+j 25.16	j 6.72
蔚山—大邱	1.64+j8.37	13.49+j 57.19	j 15.24
漢江系變壓器	j 3.0	j 3.25	
唐人里變壓器	j31.67	j31.67	
群山變壓器	j11.9	j14.06	
寧越變壓器	j 5.9	j 17.6	
蔚山變壓器	j 5.44	j 5.44	
釜山變壓器	j 4.0	j 4.0	

2-2 運轉條件 및 初期值
먼저 代表的인 運轉條件으로서는 表 2에 보인바와 같
은 1968年末의 peak 및 off-peak 時의 各 發電所 負荷想
定值를 採用하고 各發電所의 供給力 亦是 電力需給計劃
에 의한 年末 可能出力을 考慮하여 適宜 設定하였다.
但 負荷의 無効電力分에 대하여서는 이제까지의 實績을
參酌하여 力率을 平均 85% 水準에 固定하고 系統電壓
은 各發電機의 運轉電壓을 調整하여 適正範圍內에 維持
하는 것으로 하였다.

表 3은 이때 얻어진 潮流計算結果의 一例를 各發電機
의 初期值로서 整理한것이며 表 4는 實際로 計算에 使
用한 各發電機의 特性定數를 보인것이다.

表 2 1968 年末 電力需給條件

地名	供給力		負荷		備考
	發電機出力 MW	無効電力源 MVAR	peak	off-peak	
漢江系	260				260~160MW
唐人里	35				深夜 Diesel off
寧越	175				
群山	70				深夜出力 60MW
蔚山	165				深夜 發計盤 off
釜山	260				
德道			25+j 18.8	16.3+j 12.2	深夜 Load Level 은 peak 65%
沼峰			52.5+j 33	34.1+j 21.5	
梧柳			44.7+j 29.6	29.2+j 17.2	漢江線에서 T分岐
富平	j 60		84.0+j 26.8	72+j 0	安養 仁川 負荷包含
水色	j 45		138+ 47.4	114+j 12	富平 Diesel 25MW
唐人里			7+j 2.5	4.5+j 1.5	往十里 普光 負荷包含
大裡	j 10		60+j 29.1	39+j 9.6	" Diesel 40MW
尙州			30+j 21	19.5+j 13	天安 負荷包含
尙寧			8+j 4.3	5.3+j 2.6	裡里 以南 負荷包含
大邱			92+j 50.6	59.8+j 33	嶺東地區 負荷包含
進永	j 20		60+j 12.8	39+j 1.4	三陟 50MW(出力)
釜山			10+j 4.8	6.5+j 3.1	馬山 負荷包含
鳴藏			87+ 47.5	56.6+j 30.9	馬山 50MW(出力)
蔚山			45+j 21.8	29.3+j 14.2	
			81+j 48	52.7+j 31.3	

表 3. 初期運轉值(東西線運轉時)

發電機(名)	運轉電壓值(KV)	位相角(度)	初期出力(MW)
漢江系	180.0	-2.41	180.6
唐人里	163.6	-5.79	35.1
群山	170.3	8.08	70.1
寧越	183.2	10.56	143.6
蔚山	189.0	28.51	165.5
釜山	174.0	20.14	250.7

表 4. 發電機特性定數

發電機	定格容量 MVA	發電機慣性定數* x _d	H	連加連定數** α
漢江系	320	j 9.75	3.18	0.0463
唐人里	46	j 33.8	3.06	0.3348
群山	88	j23.12	3.20	0.1673
寧越	260	j 15.6	3.58	0.0506
蔚山	230	j 22.8	5.60	0.0365
釜山	281	j 6.0	3.60	0.0465

* 發電機 內部電壓인

** 慣性定數 H

$$H = \frac{1}{2} \frac{10.95GR^2 \left(\frac{N}{1,000} \right)^2}{\text{定格 KVA}} \text{ (KW-S)}$$

** 加速定數 α

$$\alpha = \frac{3 \times (\text{STEP } T)^2}{AKH \times T \text{ MVA}} \times \frac{\pi}{180} \text{ (rad/MW)}$$

但 STEPT=3%

$$AKH = H (=M/2)$$

$$T \text{ MVA} = \text{定格 MVA}$$

2-3 安定度計算 Case

먼저 故障의 種類로서는 1線接地, 2線接地 및 3線接地故障의 3者를 擇하였다. 다음에 이것이 그림 2와 같이 각각 南北線의 大田端, 尙州—大田線의 尙州端 및 尙州—大邱線의 大邱端에서 發生하였을 경우를 假定하여 이에 對備한 故障除去 時間(遮斷時間)과 再開路時間을 現有設備의 動作性能에 맞추어 여러가지로 變化시키면서 各發電機의 出力變動特性和 相差角變動特性을 檢討하였다. 表 5는 이번 檢討에서 計算한 故障條件 및 計算 Case를 整理한 것이다.

表 5. 故障條件 및 計算 Case 一覽表

故障種類	Case	故障點 (I)	大田 (II)	尙州 (III)	大田 (III)
1 線地線 (A)	A-1	3% off			3% off
	A-2	6% off			6% off
	A-3	12% off			12% off
	A-4	24% off			24% off
	A-5	故障持續			故障持續
	A-6	6% off 18% Reclose			6% off 18% Reclose
	A-7	6% off 24% Reclose			6% off 24% Reclose
2 線地絡 (B)	B-1	3% off			"
	B-3	12% off			"
	B-4	24% off			"
	B-5	故障地續			"
	B-6	6% off 18% Reclose			"
	B-7	6% off 24% Reclose			"
	3 線地絡 (C)	C-1	3% off		
C-2		6% off			"
C-3		12% off			"
C-4		24% off			"
C-5		故障持續			"
C-6		6% off 18% Reclose			"
C-7		6% off 24% Reclose			"

* 以上 49 Case를 두가지의 潮流狀態에서 檢討하였으므로 總計算 Case는 49×2=98이다.

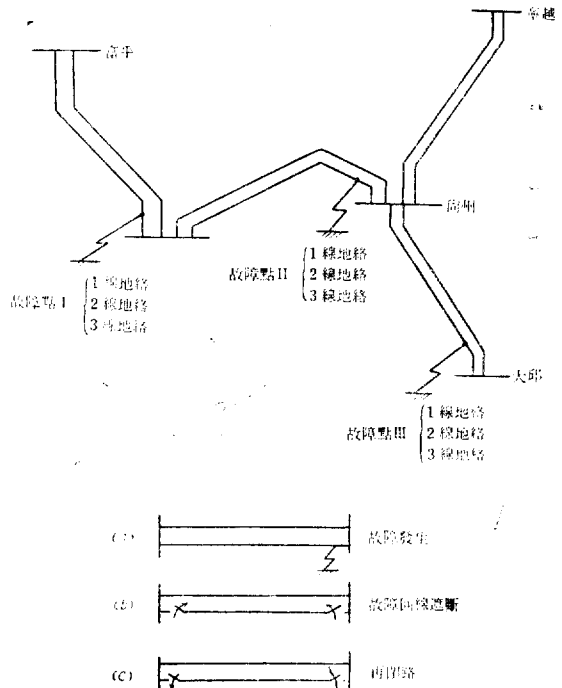


그림 2. 故障發生地點 및 系統變更狀況

3. 計算方法

計算方法의 상세한 內容 및 開發된 Program의 具體的인 說明은 다음 機會에 미루기로하고 여기서는 간단히 그 概要만을 說明하기로 한다.

多機系統의 過渡安定度の 解析에는 從來부터 主로 階段法(Step-by-step法)이 使用되어왔고 여기서도 이 方法을 採用하였으나 今般 開發된 Program에서는 그림 3에 보인바와 같이 初期電力潮流計算으로부터 故障種類에 따른 故障點插入 Admittance, 發電機內部電壓計算 및 安定度計算을 一貫해서 自動的으로 計算할수 있도록 하였다. 따라서 이 Program에서는 初期運轉條件과 故障發生에 뒤따른 系統變動狀況만 指定해주면 몇 Case이건 自動的으로 最終結果를 얻을수 있게 되고있다.

다만 計算可能한 系統規模는 이번에 使用한 計算機(FACOM-222)의 記憶容量에 制限되어 10機, 28Node 밖에 다룰수 없게되었으나 이것은 어디까지나 使用하게된 計算機의 크기에 左右되는 것으로 記憶容量만 있다면 Program上으로는 얼마라도 擴大시킬수 있는 것이다.

다음에 所要計算時間은 故障의 種類에 따른 故障點插入 아드미턴스 計算에 따라 若干 差異가 있었으나 각 Case, 30 step(90%)까지의 平均所要時間은 FACOM-222로 10分 정도였다.

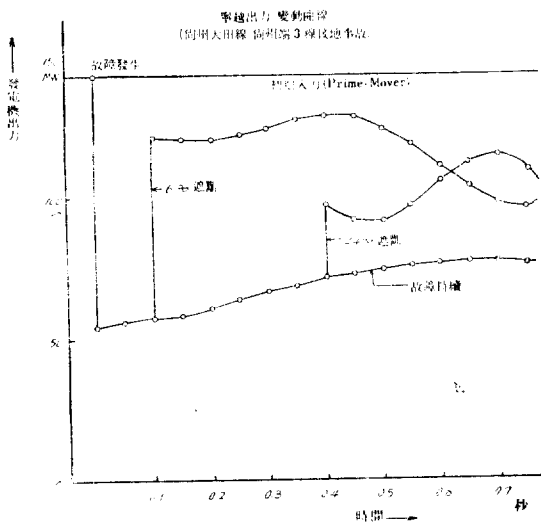


그림 3. 過渡安定度計算概要表

4. 計算結果

前記한 各計算 Case 에 대하여 故障發生으로부터 30step (1step 는 0.05秒로 3%가 되므로 全區間은 90%에 해당됨)까지의 區間內에 있어서의 現象을 計算하였다. 먼저 計算結果에 의하면 1線接地 및 2線接地故障에 대하여서는 아주 그 影響이 輕微하여 全 Case 가 이 First Swing 區間(90%)內에서 安定된 結果를 나타내고 있으므로 重點을 3線接地故障에 두어 檢討하기로 하였다.

그림 4~그림 6에 代表的인 몇가지 計算例로 보인다. 먼저 그림 4는 尙州~大田 線路(#1)의 尙州 端附近에서 3線接地故障이 發生하였다고 假定하였을 때 故障點에서 가장 가까운 寧越發電機의 出力變動狀況을 본 것이다. 이 그림에서 곧 알수 있는바와 같이 故障發生으로 寧越發電機出力이 143MW 라는 運轉狀態에서 순간적으로 出力이 55MW 까지 低下되지만 6%後 遮斷器가 動作하여 故障回線을 遮斷開路하면서 122MW 까지 回復되고 以後 漸漸히 振動하면서 原狀態로 回復되어 가고 있음을 알수 있다.

한편 이것이 24% 後 遮斷이나 또는 遮斷器의 動作不能으로 故障이 持續될 경우에는 故障狀態에서의 出力回復幅이 아주 작거나 또는 出力低下狀態가 繼續되어 寧越發電機 自身の 安定運轉 不能은 勿論 他發電機의 運轉에도 影響을 미치게되어 系統全體의 安定運轉을 不可能하게 함을 알수 있다.

다음 그림 5는 相差角變動曲線의 1例를 보인것이다. 이 Case는 南北線 3線接地事故時의 群山~釜山 火力間의 움직임을 본것인데 그림에서 곧 알수 있는바와 같이 가

령 3線接地事故와 같은 苛酷한 系統事故가 發生되더라도 保護繼電器 및 遮斷器가 正常的으로 動作하여 故障點을 12% 以內에 除去 안한다면 相差角變動이 30~40 度範圍內에 維持되어 安定度を 充分히 維持할수 있을 것이다.

萬若 이때 後備繼電器(Back-up Relay)의 動作에 依存하게되거나 (24% 遮斷) 또는 이들 保護繼電器의 動作不能으로 故障이 持續된다면 上記 兩火力間의 相差角變動이 110度 이상에 達하여 거의 安定限界에 이르거나 또는 完全히 脫調되어 安定도가 무너지게 됨을 알수 있다.

마지막으로 그림 6은 故障發生地點別로 본 安定度の 比較例이다.

곧 같은 故障이면서(여기서는 3線換地故障임) 系統이 받는 影響은 南北線보다 大田-尙州線이, 그리고 이보다 尙州-大邱線이 더 크게 받고 있다. 例를들어 6% 遮斷時를 본다면 가장 距離가 먼 漢江-釜山火力間의 相差角이 南北線事故時는 36度, 尙州-大田線 事故時엔 46度로 그리고 尙州-大邱線에서는 64度로 벌어지고 있다. 이것은 故障發生時의 初期運轉狀態에서 上記 各線路가 擔當하고 있던 潮流의 크기 및 運轉面의 寄與度를 들어 그 理由를 說明할수 있으나 여기서 特別 南北線事故의 影響이 第一 적다는것은 東西線의 竣工, 運轉으로 154KV 系統構成이 從前의 放射狀에서 完全히 脫皮하여 Loop 系統으로 增強되었기 때문이라고 말할수 있을 것이다.

다음 表 6 및 表 7은 가장 影響이 컸던 3線接地故障時의 計算結果를 整理한것이다.

이중 表 6의 各 Case는 定常的인 系統狀態에서의 變

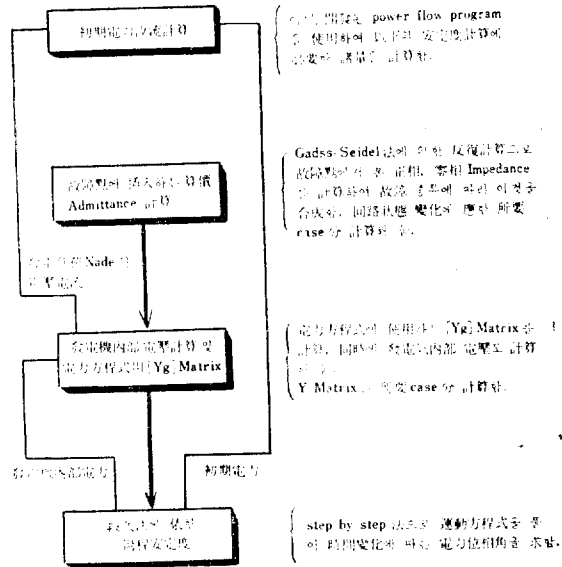


그림 4. 電力變動曲線例

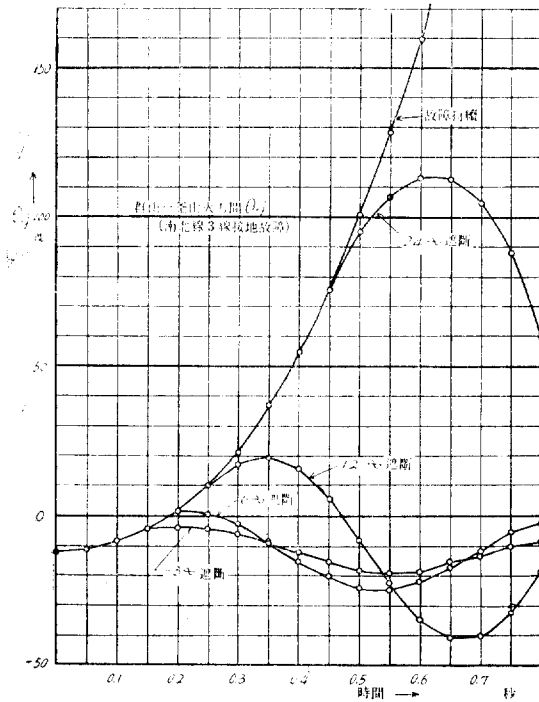


그림 5. 位相差角變動曲線

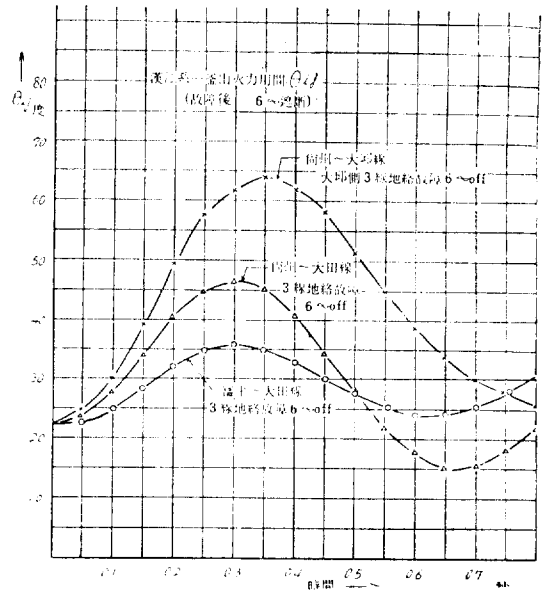


그림 6. 故障點別로 본 相差角 變動曲線

表 6. 計算結果一覽表 (Case 定常運轉時)

故障種類	故障 Case	故障點 大田	故障點 尙州	故障點 大邱
三 線 地 絡 故 障	Case 1 3% off —	安定 θ (漢江-蔚山) 40°	安定 θ (唐人里-蔚山) 42°	安定 θ (唐人里-蔚山) 60°
	Case 2 6% off —	安定 θ (唐人里-蔚山) 44°	安定 θ (漢江-釜山) 47°	安定 θ (唐人里-蔚山) 70°
	Case 3 12% off —	安定 θ (群山-蔚山) 60°	安定 θ (漢江-釜山) 64°	安定 θ (漢江-蔚山) 103°
	Case 4 24% off ---	不安定 (群山 G)	安定 θ (漢江-釜山) 102°	不安定
	Case 5 故障持續	不安定	不安定	不安定
	Case 6 6% off — 18% Reclose	安定 θ (唐人里-蔚山) 43°	安定 θ (漢江-釜山) 47°	安定 θ (唐人里-蔚山) 70°
	Case 7 6% off — 24% Reclose	安定 θ (唐人里-蔚山) 44°	安定 θ (漢江-釜山) 47°	安定 θ (唐人里-蔚山) 70°

動을 본 것이며 表 7의 各 Case 는 東西線이 事故 등으로 停止되어 있을 때의 變動을 본 것이다. 兩表의 比較에서 곧 알 수 있듯이 後者의 Case 는 Loop 構成이 못되고 따라서 그만큼 南北線의 負擔을 크게 하여 全般的으로 본

初期運轉狀態가 苛酷해지기 때문에 故障으로 받는 影響도 그만큼 커서 各 計算 Case 마다 10~30度 정도씩 相差角이 더 벌어지고 있다.

表 7. 計算結果一覽表 (Case B. 東西線停止時)

故障種類	Case	系統變更內容	故 障 點 安 定	故 障 點 安 定	故 障 點 尙 州 三
一 線 地 絡 故 障	Case 1	3 % off	$\theta_{ij} \max$ (漢江—蔚山) 75°	$\theta_{ij} \max$ (漢江—蔚山) 67°	
	Case 2	6 % off	$\theta_{ij} \max$ (唐人里—蔚山) 77°	$\theta_{ij} \max$ (漢江—蔚山) 80°	
	Case 3	12 % off	$\theta_{ij} \max$ (漢江—蔚山) 87°	$\theta_{ij} \max$ (漢江—蔚山) 117°	
	Case 4	24 % off	不 安 定	不 安 定	
	Case 5	故障持續	不 安 定	不 安 定	
	Case 6	6 % off 18% Reclose	$\theta_{ij} \max$ (漢江—蔚山) 69°	$\theta_{ij} \max$ (漢江—蔚山) 80°	
	Case 7	6 % off 24% Reclose	$\theta_{ij} \max$ (漢江—蔚山) 74°	$\theta_{ij} \max$ (漢江—蔚山) 80°	

5. 結 論

以上の計算結果 및 檢討에서 밝혀진 바와 같이 154 KV 主幹線系統의 過渡安定度는 運轉條件 및 故障種類에 따라 系統의 供給信賴度에 重要한 影響을 미칠 것으로 豫想된다. 곧 그 內容을 要約하면

- (i) 1線接地 및 2線接地故障는 比較的 그 影響이 輕微하여 現系統에서는 크게 問題되지 않는다.
 - (ii) 3線接地故障이 미치는 影響은 比較的 커서 故障發生直時 保護繼電器가 이것을 檢知하여 3%~12% 以內에 遮斷器로 하여금 故障回線을 開放하지 않으면 系統의 安定度가 무너지는 수가 있다.
 - (iii) 154KV 主幹線系統에서의 故障發生地點別로 본 系統上의 影響은 電源에 가장 가까운 尙州—大邱事故時가 第一 크게 變動하고 있고 그다음이 大田—尙州線, 大田—富平線(南北線)의 順으로 되고 있다.
 - (iv) 故障除去에 뒤따르는 再閉路問題도 이번 計算에서 檢討하였으니 系統의 安定, 不安定의 判定은 어디까지나 故障回線의 遮斷時間에 左右되고 있어 再閉路의 效果를 뚜렷하게 確認할수는 없었다. 그러나 故障의 大部分이 3~12%(경우에 따라서는 24%까지) 遮斷에서 安定狀態를 維持하고 있다는 點과 平常時 154KV 主幹線線路의 潮流가 送電容量의 60% 以上을 차지하고 있다는 實情을 考慮할때 可能한 限 早速한 時日內에 再閉路方式을 採用함이 必要할 것이다.
- 以上에서 밝혀진 몇가지 內容을 基礎로 하여 앞으로의 安定度增進對策을 列記하면
- (1) Carrier Relay의 整備 및 運用을 完全히 하여 故障回線의 高速遮斷에 萬全을 期하도록 할것

- (2) 早速한 時日內에 再閉路方式을 採用할것
- (3) 앞으로 建設될 新銳火力發電所는 大單位容量機로서 系統上의 比重을 크게 차지할 것이므로 高性能 AVR를 具備케 하여 電壓變動을 抑制시킴으로써 同期火力을 增大시키도록 할것
(이것은 過渡安定度の 向上뿐만 아니라 動態安定度の 向上에 더 크게 寄與할것이다.
- (4) 潮流制御 등으로 平常時 Loop 系統運轉에 萬全을 期할것
- (5) 事故의 波及을 最小限度로 抑制하기 위하여 電源 및 負荷遮斷을 包含한 事故時의 系統分離方式을 確立할것
- (6) 기타 發電機 機械面의 對策으로서 慣性定數(GD²)를 크게 하고 또 高感度の Governor를 具備케 하도록 하여야 할것이다.

參 考 文 獻

1. S.B. Crary: Power System Stability Book 1945
2. 梅津: 電力系統에 있어서의 安定度에 관한研究. 日本電力中研, 技術報告(1961)
3. 吉野: 電力系統信賴度改善에 관한 理論的 및 實踐的 研究 第3章 1966年刊.
4. 松本: 大型電子計算機에 의한 過渡安定度計算 Program. 關西電力 技術報告 No. 40~1008
5. 韓電: 第2次 5個年 計劃期間에 있어서의 系統問題 韓電 技術部 報告書 1968. 4
6. 韓電: 154KV 主幹線系統의 過度安定度解析 韓電 技術部 報告書 1969. 1